



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY

A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

ZVÝŠENÍ ÚČINNOSTI JEDNOFÁZOVÉHO  
ASYNCHRONNÍHO MOTORU

INCREASE OF EFFICIENCY OF A SINGLE PHASE INDUCTION MACHINE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Vojtěch Muczka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Mach, Ph.D.

BRNO 2018

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika**  
Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

**Student:** Bc. Vojtěch Muczka

**ID:** 155202

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2017/18

**NÁZEV TÉMATU:**

## **Zvýšení účinnosti jednofázového asynchronního motoru**

### **POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Provedte analýzu vlivu parametrů motoru na účinnost.
2. Provedte analýzu použití čistého hliníku na účinnost a záběrný moment.
3. Provedte optimalizaci rotorových drážek z hlediska záběrového momentu.
4. Výsledky získané pomocí programu RMxprt ověřte simulacemi metodou konečných prvků.

### **DOPORUČENÁ LITERATURA:**

- [1] PYRHONEN, J.; JOKINEN t.; HRABOVCOVÁ V. Design of rotating electrical machines. John Wiley and Sons, 2007. ISBN 978-0-470-69516-6.
- [2] BOLDEA, I. a NASAR, S. A. The induction machine handbook. Boca Raton: CRC Press, 2002. ISBN 08-49-0004-5.
- [3] HAUPT, R. L. a HAUPT, S. E. Practical genetic algorithms. Wiley-Interscience, 1998. ISBN 0-471-45565-2.

**Termín zadání:** 5.2.2018

**Termín odevzdání:** 21.5.2018

**Vedoucí práce:** Ing. Martin Mach, Ph.D.

**Konzultant:**

**doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.**  
předseda oborové rady

### **UPOZORNĚNÍ:**

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá zvýšením účinnosti jednofázového asynchronního motoru změnou materiálu klece a optimalizací rozměrů rotorové drážky za podmínky dodržení stejného záběrného momentu. První část seznamuje čtenáře o principu činnosti tohoto stroje. Následující část je pak věnována měření jednofázového motoru firmy ATAS, simulaci jeho parametrů a porovnání výsledků. V další části se práce věnuje analýze vlivu změny velikosti drážky a kruhů při použití čistého hliníku místo rezistivní slitiny na parametry stroje. Poté je provedena optimalizace tvaru drážky v programu RMxpert, který je ovládán genetickým algoritmem napsaným v prostředí MATLAB. Na závěr je provedeno ověření výsledků pomocí metody konečných prvků v programu Ansys Maxwell a následné porovnání naměřených, simulovaných a předpokládaných nových hodnot stroje.

## **Abstract**

This thesis is dedicated to efficiency increase of one phase induction machine through material change of induction cage and rotor slot shape optimization under the condition of maintaining the same locked-rotor torque. In the first part of this thesis is the explanation of induction machine principles. Next is the comparison of measured and simulated parameters of small one phase machine from ATAS company. The following part is dedicated to the analysis of rotor slot shape and ring size influence on machine parameters when using pure aluminum instead of resistive alloy. The next chapter deals with slot shape optimization in the program RMxpert, controlled by genetic algorithm written in MATLAB interface. In the final part are the resultant slot shapes simulated in Ansys Maxwell using finite element method and then the measured, simulated and expected parameters are compared.

## **Klíčová slova**

Asynchronní motor, momentová charakteristika, RMxpřt, optimalizace tvaru drážek, genetický algoritmus, účinnost, záběrný moment

## **Keywords**

Induction motor, torque characteristics, RMxpřt, slot optimization, genetic algorithm, efficiency, locked-rotor torque

## **Bibliografická citace:**

MUCZKA, V. *Zvýšení účinnosti jednofázového asynchronního motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 88 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Mach, Ph.D..

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Zvýšení účinnosti jednofázového asynchronního motoru jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 20. května 2018

.....  
podpis autora

## Poděkování

Děkuji vedoucímu semestrální práce Ing. Martinu Machovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé semestrální práce.

V Brně dne 20.května 2018

.....  
podpis autora

# Obsah

1	Úvod .....	1
2	Obecný popis motoru .....	2
2.1	Asynchronní motor s pomocnou fází .....	4
2.2	Asynchronní motor s kondenzátorem .....	4
2.2.1	S rozběhovým kondenzátorem .....	4
2.2.2	Se dvěma kondenzátory .....	5
2.2.3	Vinutí s odbočkami .....	5
2.3	Asynchronní motor se stíněným pólem .....	5
3	Princip činnosti .....	6
3.1	Tvar rotorových drážek .....	9
3.2	Skinefekt v rotoru .....	11
3.2.1	Změna činného odporu .....	11
3.3	Rozptylový tok .....	13
3.4	Výkonové ztráty v motoru .....	14
3.5	Optimum účinnosti .....	16
4	Optimalizační metody .....	18
4.1	Evoluční algoritmy .....	19
4.1.1	Genetický algoritmus .....	20
5	Rozbor parametrů motoru .....	24
5.1	Analyzovaný stroj .....	24
5.2	Měření jednofázového motoru J22VV506 .....	25
5.3	Simulace motoru pomocí programu ANSYS Maxwell .....	27
5.3.1	Simulace různých úprav rotoru .....	32
6	Optimalizace rotorové drážky .....	40
6.1	Provázání programů MATLAB a RMXprt .....	40
6.2	Úprava modelu pro snadnou optimalizaci .....	40
6.3	Optimalizace drážky .....	43
6.4	Ověření optimalizovaných drážek pomocí MKP .....	51
6.4.1	Optimalizovaná drážka č.1 .....	53
6.4.2	Optimalizovaná drážka č.2 .....	63
6.4.3	Optimalizovaná drážka č.3 .....	65
6.5	Odhad výsledných parametrů motoru .....	68
7	Závěr .....	70
	Literatura .....	73
	Seznam symbolů a zkratk .....	76

# Seznam obrázků

Obrázek 1: Momentová charakteristika pulzujícího pole (převzato z [11]) .....	3
Obrázek 2: Motor s rozběhovým kondenzátorem a jeho fázorový diagram (převzato z [1]) .....	4
Obrázek 3: Asynchronní motor se dvěma kondenzátory a) schéma, b) fázorové diagramy při nulových a jmenovitých otáčkách (převzato z [1]).....	5
Obrázek 4: Vznik tažné síly ASM (převzato z [10]).....	6
Obrázek 5: Průběh momentu bez uvažování rozptylu [4] .....	7
Obrázek 6: Průběh momentu s uvažováním vlivu rozptylové indukčnosti [4].....	8
Obrázek 7: Momentová charakteristika jednofázového ASM (převzato z [12]) .....	9
Obrázek 8: Dvojitá klec, vírová klec, momentová charakteristika (převzato z [10])	9
Obrázek 9: Průřez klínovou drážkou (převzato z [2]).....	12
Obrázek 10: Závislost výsledné rotorové frekvence na velikosti sycení při konst. zátěži [4] .....	16
Obrázek 11: Závislost celkových ztrát na rotorovém kmitočtu pro různé otáčky a zatížení [4] .....	17
Obrázek 12: Flowchart Genetického Algoritmu [5].....	21
Obrázek 13: Příklad křížení genetického algoritmu.....	23
Obrázek 14: Tvar rotorové drážky měřeného stroje .....	24
Obrázek 15: Měřicí pracoviště .....	24
Obrázek 16: Model jednofázového asynchronního motoru v programu RMxpert....	27
Obrázek 17: Magnetizační charakteristika plechu M700-50A (převzato z [3]) .....	28
Obrázek 18: Křivka měrných ztrát plechu M700-50A (převzato z [3]).....	29
Obrázek 19: Porovnání momentové charakteristiky měření a simulace .....	30
Obrázek 20: Porovnání účinností měření a simulace v závislosti na zatěžovacím momentu .....	30
Obrázek 21: Porovnání momentových charakteristik pro různé šířky kruhu .....	34
Obrázek 22: Porovnání závislostí účinnosti na otáčkách pro různé šířky kruhu.....	35
Obrázek 23: Různé tvary drážek - a) původní , b) zmenšená výška $h_{s2}$ , c) poměrově zmenšená d) obdélníková 1:4 .....	36
Obrázek 24: Momentové charakteristiky pro různé tvary drážek.....	37
Obrázek 25: Závislost účinnosti na otáčkách pro různé tvary drážek.....	38
Obrázek 26: Návrh drážky - snížení výšky $h_{s2}$ a výšky kruhů.....	39
Obrázek 27: Parametrizování optimalizované drážky (převzato z [24]).....	41
Obrázek 28: Segmentace drážky v programu RMxpert a prvotní optimalizace .....	42
Obrázek 29: Optimalizovaná drážka - stejná plocha drážky jako původní +-10%..	44
Obrázek 30: Optimalizovaná drážka - stejná plocha drážky jako původní +-20%..	44



Obrázek 31: Postupné zjednodušování optimalizované drážky - bez omezení plochy.....	45
Obrázek 32: Obecný zjednodušený tvar optimalizované drážky .....	46
Obrázek 33: Výsledky optimalizované drážky - zjednodušený tvar .....	46
Obrázek 34: Momentová charakteristika - porovnání původní a optimalizované drážky .....	47
Obrázek 35: Charakteristika účinnosti – porovnání původní a optimalizované drážky .....	48
Obrázek 36: Charakteristika účinníku - porovnání původní a optimalizované drážky .....	48
Obrázek 37: Výsledek optimalizované otevřené drážky - zjednodušený tvar .....	49
Obrázek 38: Výsledky optimalizované drážky pro maximální účinnost a) Plocha +- 10 %,.....	50
Obrázek 39: Model motoru pro simulaci pomocí FEM.....	51
Obrázek 40: Síťování modelu pro simulaci pomocí FEM .....	52
Obrázek 41: Rozměry optimalizované drážky č.1 a porovnání s původní drážkou	54
Obrázek 42: Detail optimalizované drážky č.1 .....	54
Obrázek 43: Rozložení indukce v motoru s původní drážkou (vlevo) a s optimalizovanou drážkou č.1 (vpravo) .....	55
Obrázek 44: Rozložení ztrát v železe v motoru s původní drážkou .....	56
Obrázek 45: Rozložení ztrát v železe v motoru s optimalizovanou drážkou č.1 .....	57
Obrázek 46: Rozložení proudové hustoty v tyčích motoru s původní drážkou.....	58
Obrázek 47: Rozložení proudové hustoty v tyčích motoru s optimalizovanou drážkou č.1.....	59
Obrázek 48: Detail kulatých drážek č.1 .....	60
Obrázek 49: Graf závislosti záběrného momentu a účinnosti na průměru kulaté drážky .....	61
Obrázek 50: Graf závislosti ztrát a jmenovitých otáček na průměru kulaté drážky	62
Obrázek 51: Rozměry optimalizované drážky č.2 a porovnání s původní drážkou	63
Obrázek 52: Detail optimalizované drážky č.2 .....	63
Obrázek 53: Porovnání tvaru nezaoblené a zaoblené drážky č.2.....	65
Obrázek 54: Rozměry optimalizované drážky č.3 a porovnání s původní drážkou	65
Obrázek 55: Detail optimalizované drážky č.3 .....	66
Obrázek 56: Rozložení proudové hustoty v tyčích motoru s optimalizovanou drážkou č.3.....	67
Obrázek 57: Rozložení indukce v motoru s původní drážkou (vlevo) a s optimalizovanou drážkou č.3 (vpravo) .....	67

# Seznam tabulek

Tabulka 1: Ruletová selekce - příklad váhování podle pořadí.....	22
Tabulka 2: Štítkové hodnoty měřeného motoru.....	24
Tabulka 3: Naměřené hodnoty při zkoušce záběrového momentu - zastudena .....	25
Tabulka 4:Naměřené hodnoty při zkoušce záběrového momentu - zatepla .....	25
Tabulka 5: Odpor a oteplení vinutí při měření.....	25
Tabulka 6: Měření jmenovitého bodu motoru ATAS J22VV506 .....	26
Tabulka 7: Měření zatěžovací charakteristiky .....	26
Tabulka 8: Účinnost stroje při zatížení.....	26
Tabulka 9: Porovnání parametrů a ztrát ve jmenovitém bodě .....	31
Tabulka 10: Změna parametrů stroje v závislosti na střední šířce drážky.....	32
Tabulka 11: Změna parametrů stroje v závislosti na hloubce drážky.....	33
Tabulka 12:Porovnání momentových charakteristik - šířka kruhu 4mm/10mm...	34
Tabulka 13: Simulace různých tvarů drážek .....	36
Tabulka 14: Porovnání jmenovitých parametrů původní a optimalizované drážky - RMxpřt.....	47
Tabulka 15: Záběrný moment - srovnání hodnot původní drážky .....	52
Tabulka 16: Jmenovitý chod - srovnání hodnot původní drážky .....	53
Tabulka 17: Porovnání výsledků drážky č.1 - Záběrný moment .....	54
Tabulka 18: Porovnání výsledků drážky č.1 - Jmenovitý chod.....	55
Tabulka 19:Porovnání výsledků drážky č.1 s kulatou - Záběrný moment.....	60
Tabulka 20: Porovnání výsledků drážky č.2 - Záběrný moment .....	64
Tabulka 21: Porovnání výsledků drážky č.2 - Jmenovitý chod.....	64
Tabulka 22: Porovnání výsledků drážky č.3 - Záběrný moment .....	66
Tabulka 23: Porovnání výsledků drážky č.3 - Jmenovitý chod.....	66
Tabulka 24: Odhad parametrů stroje s novým tvarem drážek .....	68
Tabulka 25: Předpokládané ztráty stroje s novým tvarem drážek .....	69

# 1 ÚVOD

Asynchronní stroje jsou velmi rozšířené v průmyslovém odvětví hlavně díky jejich spolehlivosti, jednoduché konstrukci, nízké ceně a minimálním nárokům na údržbu. Velký podíl vyprodukované elektrické energie je spotřebován právě elektromotory, a proto jsou v dnešní době zavedeny legislativní normy stanovující třídy účinnosti pro točivé stroje daných výkonů.

Účinnost je dána podílem mechanického výkonu na hřídeli a příkonu přivedeného na svorky motoru. Vyjadřuje, jak velká část dodané energie je přeměněna na užitečnou energii a na neužitečné ztrátové teplo. Pro dosažení co nejvyšší účinnosti je potřeba stroj optimalizovat jak z hlediska konstrukčního, tak i materiálového. Díky tomu dojde ke snížení Jouleových ztrát ve vinutí nebo snížení ztrát v magnetickém obvodu.

Cílem této práce je nahradit materiál klece s velkou rezistivitou  $\text{AlSi12Mn}$  čistým hliníkem. Díky této změně dojde k výraznému zlepšení účinnosti a parametrů v pracovní oblasti, ale ke zhoršení záběrného momentu. Tvar rotorové drážky ovlivňuje parametry celého stroje – magnetizační a rozptylové indukčnosti, Jouleovy ztráty, ztráty v železe, momentovou charakteristiku a další. Proto bude následně tvar rotorové drážky optimalizován tak, aby bylo dosaženo původního záběrného momentu a zároveň došlo ke zlepšení účinnosti ve jmenovitém bodě. Optimalizace bude prováděna pomocí genetického algoritmu, metodou konečných prvků programu Maxwell a také pomocí analytického softwaru RMaxprt.

## 2 OBECNÝ POPIS MOTORU

Asynchronní motory jsou nejrozšířenější elektrické stroje především díky jejich jednoduché konstrukci, spolehlivosti, malým nárokům na údržbu a nízké ceně. Pracují na principu přeměny elektrické energie na energii mechanickou pomocí elektromagnetického pole. Jsou tvořeny ze dvou částí – pevná část, nebo-li stator a pohyblivá část, rotor. Statorový paket je složen z plechů (kvůli snížení vířivých proudů), ve kterých jsou vyraženy drážky na uložení vinutí. Rotor je také složen z plechů, avšak vinutí uložené v jeho drážkách může být buďto vinuté (měděný drát spojený do hvězdy s konci vinutí vyvedenými na kroužky) nebo odlévané (klec nakrátko, složená z hliníkových/měděných tyčí spojených kruhy nakrátko na čelních stranách).[5]

Systémy, ve kterých jsou elektromotory provozovány, reprezentují cca 70 % elektrické energie spotřebované v průmyslu. V dnešní době jsou proto kladeny legislativní normy na účinnost, díky čemuž je potřeba stroje co nejvíce optimalizovat, aby bylo dosaženo co nejlepších parametrů pro danou aplikaci.[18]

Účinnost motorů lze zvýšit mnoha způsoby. Nejjednodušší, ale také jeden z nejnákladnějších je použití kvalitnějších materiálů, například plechy s menšími měrnými ztrátami, čímž by došlo ke snížení ztrát v železe. Určit přesné vlastnosti materiálů je však velmi náročné, jelikož mají nelineární charakteristiky a navíc se jejich hodnoty mění i při výrobním procesu motoru (lisování, svařování, stříhání, ...). Také sycením stroje mohou být ztráty optimalizovány. Dnešní motory jsou navrhovány na co nejvyšší možné sycení, aby byla dosažena kompaktnost stroje. To má však za následek zvýšení ztrát v železe, které mohou být i dvojnásobné v porovnání s historickými motory. Jelikož jsou však tyto ztráty vzhledem k celkovým poměrně malé (asi 20 %), vyplatí se zlepšit parametry stroje právě navýšením sycení.[3],[4],[15],[18]

U malých motorů může být až 50 % z celkové sumy ztrát tvořeno Jouleovými ztrátami ve statorovém vinutí. Ty mohou být optimalizovány počtem závitů vinutí, plněním drážky, materiálem vodiče a délkou jednoho závitu. Tato optimalizace však není snadná z technologického (např. maximální plnění, které může reálně v drážce být) nebo z funkčního hlediska, kdy změnou počtu závitů je ovlivněno sycení, změní se indukčnost a v konečném důsledku mohou Jouleovy ztráty narůst v důsledku zvýšení jalové složky proudu.[3],[4]

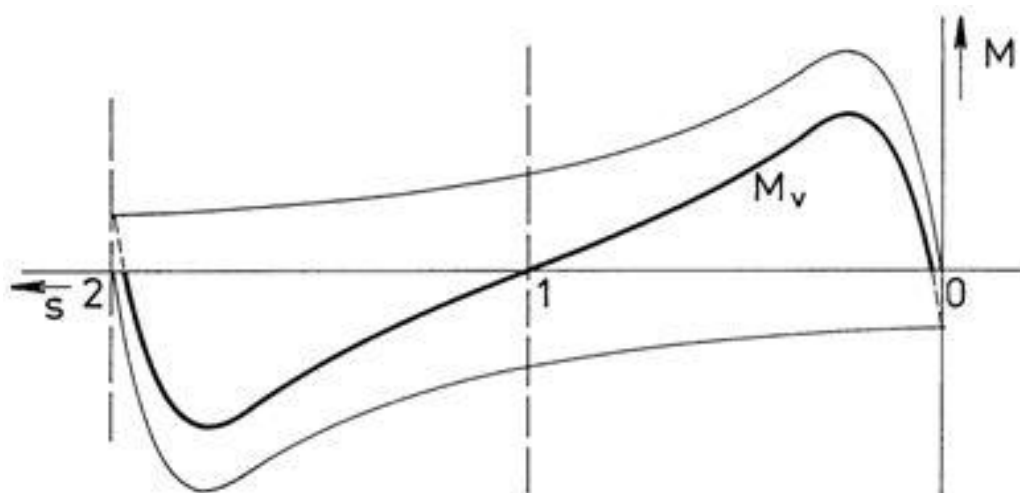
Jouleovy ztráty vznikají také v kleci v rotoru. Závisí na použitém materiálu, teplotě a rozměrech klece. Optimalizovat rotorovou klec je však problematické, jelikož tvar drážek neovlivňuje jen odpor klece, ale také magnetický obvod celého stroje. Při špatném tvaru drážky může docházet k nerovnoměrnému zatékání materiálu do drážek (snížení vodivosti), přesycování rotorových plechů a tím

snížení celkových parametrů motoru. Tato práce se bude zabývat optimalizací rotoru pomocí metody konečných prvků. Nový tvar drážky bude navržen pro co nejvyšší účinnost ve jmenovitém bodě a zároveň bude kladen důraz na dosažení co nejvyššího záběrového momentu. [3]

Nejčastější využití jednofázových asynchronních motorů je v domácnostech, kde jsou přímo připojené na síť, pracující s konstantními otáčkami. Nastává zde však oproti třífázovému motoru komplikace. Pokud bychom měli pouze jednu cívku připojenou k harmonickému zdroji, nelze takto vytvořit točivé pole, ale pouze pole pulzující. Výsledná síla působící na vodiče v kotvě by byla nulová, jelikož se jednotlivé složky vyruší. Kotva se tedy chová jako transformátor nakrátko.

Pulzující pole může být rozděleno na dvě složky (dva fázory) o poloviční amplitudě toku – dopřednou a zpětnou. Dopředná se otáčí ve směru otáčení rotoru se skluzem  $s$  a zpětná se otáčí proti směru pohybu se skluzem  $2-s$ . Tato reprezentace je výhodná z hlediska náhradních schémat.[1]

Na Obrázek 1 můžeme vidět momentovou křivku dopředného pole (nahore), zpětného pole (dole) a výslednici  $M_v$ . Pokud je motor zastavený ( $s=1$ ), je výsledný moment pole nulový. Jakmile však dojde k jeho roztočení (v libovolném směru), bude jedna složka pole převažovat nad druhou a začne působit výsledný moment.[1]



Obrázek 1: Momentová charakteristika pulzujícího pole (převzato z [11])

Aby však byly motory schopny samostatného rozběhu je zapotřebí vytvořit točivé pole při nulových rychlostech rotoru, čehož můžeme docílit několika způsoby.[1]

## 2.1 Asynchronní motor s pomocnou fází

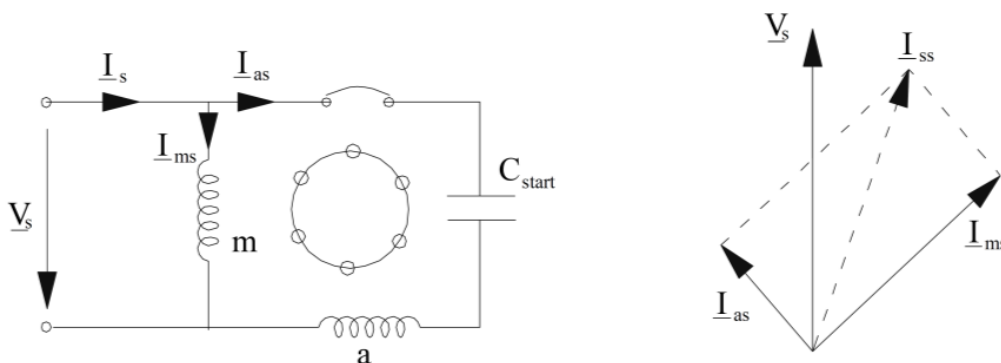
Na statorovém svazku jsou navinuty dva druhy vinutí. Hlavní, které je navinuto na 2/3 svazku a slouží primárně pro běh motoru. Pomocné, které zajistí rozběh motoru při nulových otáčkách a při vyšších otáčkách dojde k jeho odpojení (odstředivým/magnetickým vypínačem). Pomocné vinutí je vůči hlavnímu pootočené o 90 stupňů, čímž je zajištěno, že k pulzujícímu jednofázovému poli je přičtena další složka toku, vytvářející výsledné rotační magnetické pole. Poměr rezistence a reaktance pomocného vinutí je jiný než u hlavního, čímž je dosažen fázový posun proudů v jednotlivých vinutích. Točivé pole pak indukuje napětí v rotoru, díky čemuž indukované proudy vytvoří moment a motor se začne otáčet. Jakmile rotor dosáhne dostatečné rychlosti, dojde k odpojení pomocného vinutí a motor pracuje pouze na hlavní vinutí, což má za následek špatný účinník. Obvykle se tento typ rozběhu využívá u strojů do 300 W.[1]

## 2.2 Asynchronní motor s kondenzátorem

Připojení kondenzátoru k pomocnému vinutí má za následek fázový posun proudu pomocným vinutím až o 90 ° vůči hlavnímu proudu. Tento způsob je výhodný, jelikož dochází ke zlepšení záběrného a jmenovitého momentu, účinnosti a účinníku. Existují různé konfigurace motorů s kondenzátorem.[1]

### 2.2.1 S rozběhovým kondenzátorem

Kondenzátor je sériově připojen k pomocnému vinutí, čímž posouvá proud o téměř 90 °. Tím je dosaženo vytvoření silného točivého magnetického pole a tím i velkého záběrného momentu při malých otáčkách rotoru. Po rozběhu je však pomocné vinutí odpojeno, jelikož velká hodnota kapacity by za běhu motoru snižovala jeho účinnost a účinník.[1]

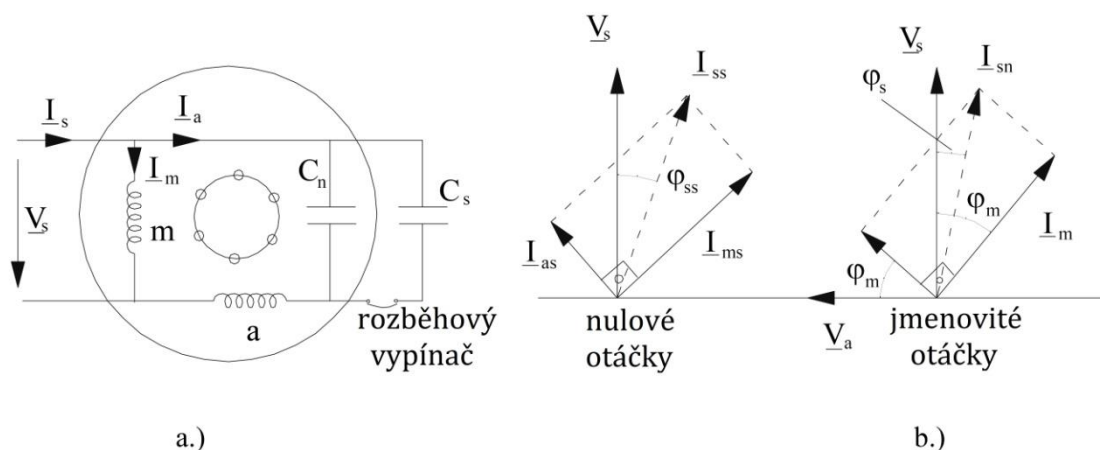


Obrázek 2: Motor s rozběhovým kondenzátorem a jeho fázorový diagram (převzato z [1])

### 2.2.2 Se dvěma kondenzátory

Dva různé kondenzátory jsou připojeny sériově k pomocnému vinutí. Běhová kapacita zůstává neustále připojena, ale rozběhový kondenzátor je po roztočení stroje odpojen. Tím je zajištěn optimální chod při nulových i jmenovitých otáčkách. Některé z výhod běhového kondenzátoru[1]:

- Zvýšení momentu zvratu až o 30 %
- Zvýšení účinnosti až o 10 %
- Hodnoty účinníku nad 0,9



Obrázek 3: Asynchronní motor se dvěma kondenzátory  
a) schéma, b) fázorové diagramy při nulových a jmenovitých otáčkách (převzato z [1])

### 2.2.3 Vinutí s odbočkami

Tento způsob je využíván převážně tam, kde je zapotřebí provozovat motor při různých otáčkách. Hlavní vinutí je rozděleno na dvě nebo více částí a v závislosti na tom, která odbočka bude napájena (sériovo-paralelní kombinace pomocného a částí hlavního vinutí), se bude měnit chod stroje. Sériově k pomocnému vinutí je neustále připojen kondenzátor.[1]

## 2.3 Asynchronní motor se stíněným pólem

Tohoto principu se užívá pouze pro stroje s malým výkonem, jelikož jeho výroba je velmi levná, ale motor má špatné parametry. Princip fungování spočívá v tom, že část toku protékající pólovým nástavcem prochází závitem nakrátko. V něm dochází k indukovaní napětí, průtoku proudu a vytvoření reakčního pole, které v dané části pólového nástavce způsobuje fázový a prostorový posun toku. Výsledný tok pak vytváří točivé pole díky součtu jednotlivých toků. [1]

Momentová charakteristika motoru se stíněným pólem má patrné sedlo ve 2/3 skluzu. To je způsobeno tím, že vinutí není umístěno v drážkách, ale na

pólových nastavcích, čímž nemá pole v mezeře sinusové rozložení. Jeho tvar se blíží deformovanému obdélníku a díky vyšším harmonickým proudům dochází právě v tomto místě momentové charakteristiky k poklesu.[14]

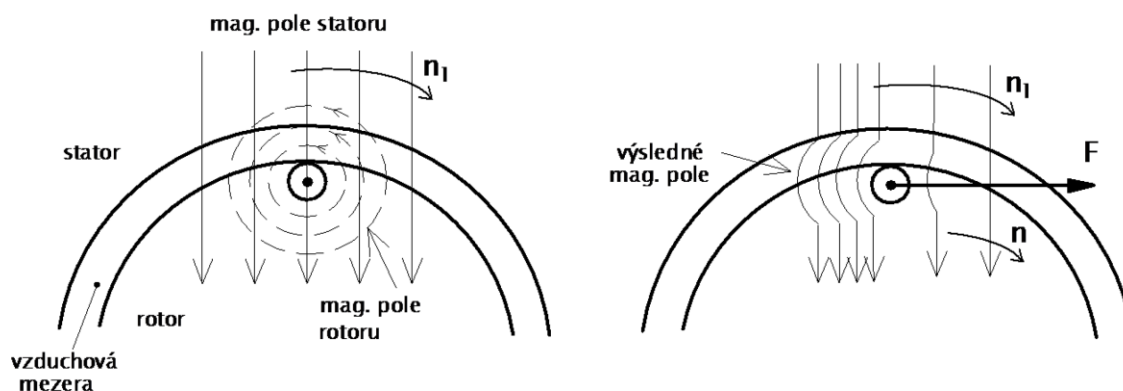
### 3 PRINCIP ČINNOSTI

Asynchronní motor se chová jako napěťový transformátor pracující na skluzovém kmitočtu a syčení magnetického obvodu je dáno integrálem napájecího napětí. Při odbuzování se snižuje maximální moment a při přebuzení dochází k přesycování magnetického obvodu a tím i ke strmému nárůstu magnetizačního proudu. Velikost vzduchové mezery ovlivňuje vodivost magnetického obvodu a při zvětšování mezery tato vodivost klesá, což má za následek snížení indukčnosti. Pokud je zachován průběh napájecího napětí musí zůstat magnetický tok stejný a proto dojde ke zvýšení magnetizačního proudu vlivem snížení indukčnosti, což můžeme vidět z následující rovnice. To je důvod proč je vhodné při návrhu asynchronního stroje vytvořit co nejmenší vzduchovou mezeru. [4]

$$\underbrace{N \cdot \Phi_{s,max}}_{\Psi_{max}} = L \cdot I_{max} \quad (3.1)$$

Při napájení statorového vinutí dochází k vytvoření točivého elektromagnetického pole. Siločáry pole prostupují klecí rotoru a indukují v ní napětí, díky kterému protékají klecí proudy v závislosti na odporu a indukčnosti. Tyto proudy vytvářejí magnetické pole a vzájemnou interakcí statorového a rotorového pole působí na rotor síla způsobující otáčení motoru. Je tedy zřejmé, že asynchronní motor nemůže pracovat na synchronních otáčkách, jelikož by nedocházelo k indukování napětí dopředné složky pole a působící síla ve směru otáčení by byla nulová.[1],[4],[5]

$$U_{rot} \sim \Phi_{s,max} \cdot 2\pi \cdot f_{rot,el} \quad (3.2)$$



Obrázek 4: Vznik tažné síly ASM (převzato z [10])

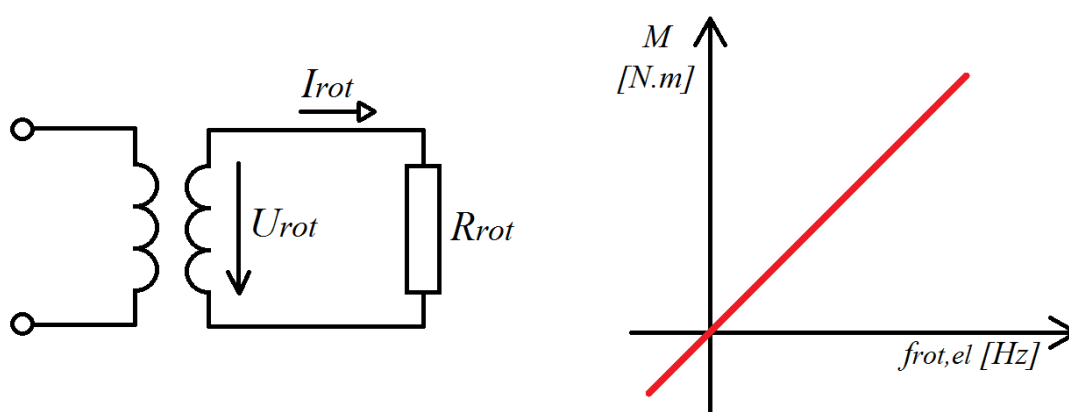


Pokud bychom uvažovali případ, kdy je rozptyl mezi statorem a rotorem nulový, bude rotorovým vinutím procházet proud daný podílem indukovaného napětí a odporu klece. Vyjdeme-li z rovnice pro sílu na vodič v magnetickém poli a za proud dosadíme podíl napětí a odporu, můžeme odvodit rovnici pro moment.[4]

$$M \sim B_{s,max} \cdot \frac{U_{rot}}{R_{rot}} \sim \frac{B_{s,max}}{R_{rot}} \cdot \Phi_{s,max} \cdot 2\pi \cdot f_{rot,el} \quad (3.3)$$

$$M \sim f_{rot,el} \quad (3.4)$$

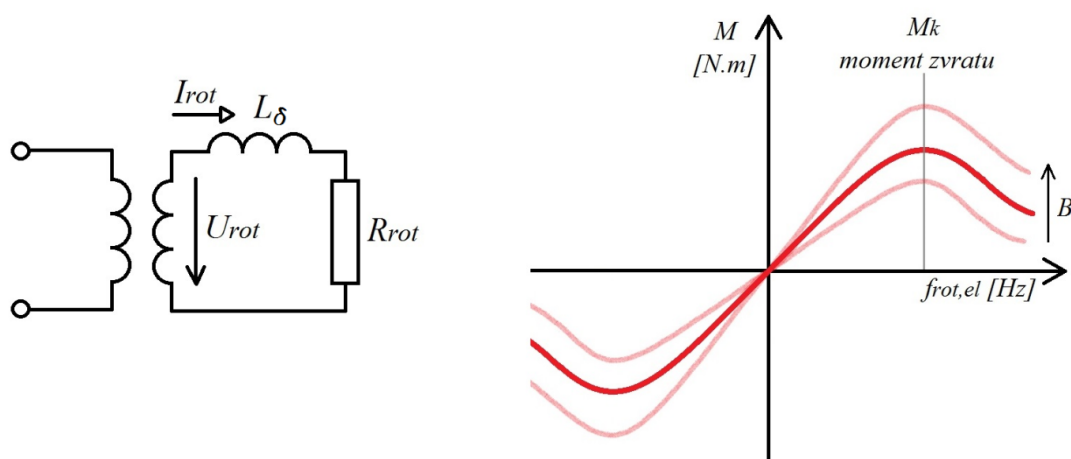
Při konstantním napájení je pak moment úměrný pouze skluzovému kmitočtu a momentová charakteristika by měla tvar přímky.



Obrázek 5: Průběh momentu bez uvažování rozptylu [4]

Pokud však zohledníme vliv rozptylu, bude proud tekoucí klecí rotoru závislý na frekvenci indukovaného napětí. Pro vysoké kmitočty bude jeho velikost limitována i při zvyšujícím se indukovaném napětí. Momentová charakteristika by pak měla konstantní velikost nezávisle na velikosti indukovaného napětí. Jelikož však stále roste fázový posun mezi indukovaným napětím a proudem, dochází k poklesu momentu.[4]

$$I_{rot} = \frac{U_{rot}}{\sqrt{R_{rot}^2 + (2\pi \cdot f_{rot,el} \cdot L_{\sigma})^2}} \quad (3.5)$$



Obrázek 6: Průběh momentu s uvažováním vlivu rozptylové indukčnosti [4]

Pro vyšší rotorové kmitočty je velikost odporu rotoru zanedbatelná vůči velikosti rozptylové indukčnosti. Proto můžeme vzorec pro moment upravit a jeho velikost bude úměrná druhé mocnině magnetické indukce statorového pole.[4]

$$M \sim B_{s,max} \cdot \frac{B_{s,max} \cdot 2\pi \cdot f_{rot,el}}{f_{rot,el} \cdot L_\sigma} \sim B_{s,max}^2 \quad (3.6)$$

Tvar magnetického pole v mezeře při nulových rotorových proudech závisí na rozložení statorových vinutí, poměru amplitud a fázovém posuvu hlavního a pomocného proudu. Pokud nejsou průběhy proudů sinusové, tak je vlivem magnetické saturace rozložení pole ještě daleko komplikovanější. Proto se při výpočtech uvažuje většinou pouze první a třetí harmonická složka, která způsobuje výrazný pokles momentové křivky. [1]

Bude-li uvažováno sinusové rozložení magnetomotorického napětí hlavního i pomocného vinutí, pak výsledný vektor a jeho amplituda můžou být zapsány těmito vzorci[1]:

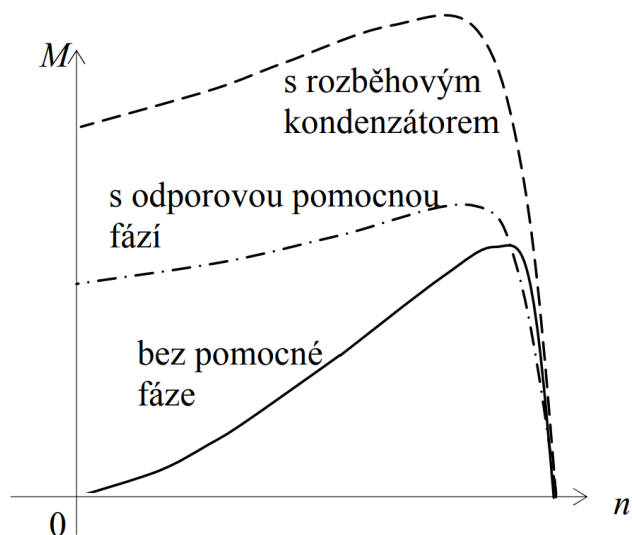
$$F(t) = F_{1m} \cdot \sin(\omega_{1t}) + j \cdot F_{1a} \cdot \sin(\omega_{1t} + \gamma_i) \quad (3.7)$$

$$F_{ampl}(t) = \sqrt{F_{1m}^2 \cdot \cos^2(\omega_{1t}) + F_{1a}^2 \cdot \sin^2(\omega_{1t} + \gamma_i)} \quad (3.8)$$

Jedině pro případ, kdy jsou amplitudy jednotlivých magnetomotorických napětí stejné a fázově posunuty o 90 ° je výsledný hodograf kruhový, jinak má eliptický tvar. Směr otáčení pole lze jednoduše změnit znaménkem u fázového posuvu jednotlivých složek. Toho dosáhneme například tak, že kondenzátor pomocného vinutí připojíme na hlavní vinutí. [1]

Moment jednofázového asynchronního stroje lze ovlivňovat mnoha faktory, převážně typem pomocného vinutí a připojeným kondenzátorem. Přibližná momentová křivka je znázorněna na Obrázek 7, kdy bez pomocného vinutí je

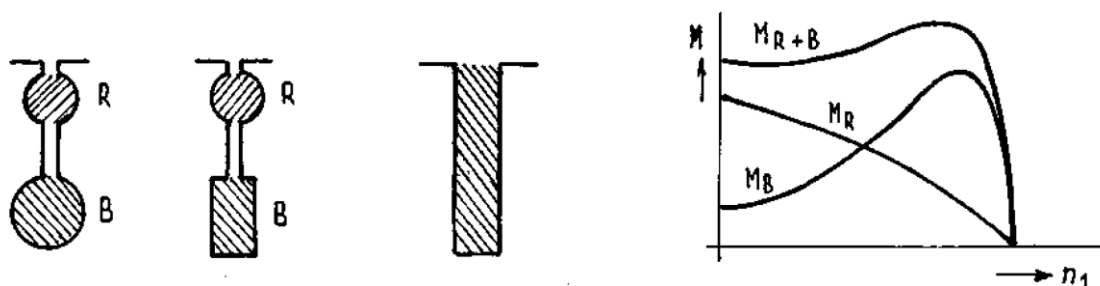
záběrný moment nulový kvůli pulzujícímu magnetickému poli. Je-li však ve stroji pomocné vinutí, stane se z pulzujícího pole rotační a motor produkuje výrazný záběrný moment.



Obrázek 7: Momentová charakteristika jednofázového ASM (převzato z [12])

### 3.1 Tvar rotorových drážek

Geometrií rotorových drážek lze jednoduše ovlivnit tvar momentové charakteristiky, především rozběhovou oblast. Pro zvýšení záběrového momentu jsou voleny hluboké, úzké drážky. Rozptylová indukčnost je tím větší, čím je vodič umístěn hlouběji v drážce. Proto je proud při rozběhu převážně v horní části vinutí. Dojde tak ke snížení efektivního průřezu vodiče, zvětšení odporu, zvýšení záběrného momentu a snížení záběrného proudu. Pokud je na rotoru pouze jedna hluboká klec, nazýváme ji vírová. Můžou však být přítomny dvě různé klece. Jedna na povrchu (rozběhová) a jedna uložena hlouběji v rotoru (běhová). U dvojité klece nebo i svařované klece mohou být použity dva nebo více materiálů s různou rezistivitou, čímž je zajištěn optimální chod jak při běhu tak i rozběhu. Mezi klecemi je vzduchová mezera, aby se hlavní magnetický tok uzavíral až pod spodní klecí.[2],[5],[10]



Obrázek 8: Dvojitá klec, vírová klec, momentová charakteristika (převzato z [10])

Pro dosažení co největšího záběrného momentu je zapotřebí malý průřez (malá výška) vodiče v rotorové drážce co nejbližší povrchu. Takový motor má však horší účinnost a větší skluz. Účinnost zvýšíme naopak tím, že drážku prohloubíme a zvětšíme její šířku, aby se při běhu snížil odpor klece. Proto je nutno zvolit vhodný kompromis. Pokud se chceme vyhnout velkým přídavným ztrátám, je potřeba odlít drážku tak, aby hliník nezatekl do krčku drážky (u otevřené drážky). Může být taky použita uzavřená drážka a do krčku z vnější strany udělán výbrus, čímž se zlepší některé parametry stroje.[2]

Při odlévání klece do drážek rotoru můžou vzniknout nehomogenní oblasti například vzduchové bubliny, které snižují plnění drážky. V dnešní době jsou tři nepoužívanější metody odlévání klece[13]:

- Vysokotlaké – spočívá v natlačení roztaveného hliníku vysokým tlakem do spodního kruhu, přes drážky až do horního kruhu nakrátko. Tento proces musí být rychlý, aby nedošlo k zatuhnutí hliníku před dokončením odlévání.
- Nízkotlaké – svazek je předeheřán na určitou teplotu a díky podtlaku je hliník vtáhnut do drážek a kruhů. Z hlediska zatékání hliníku je nízkotlaké lití výhodnější oproti vysokotlakému, jelikož může být svazek různých tvarů a neomezené velikosti.
- Odstředivé lití – hliník je vertikálně naléván na osu rotoru a vlivem odstředivé síly protéká drážkami. Odstředivá síla tlačí hliník k vnějšímu okraji drážek, kde tuhne. Na vnitřní straně drážek naopak proudí roztavený hliník, dokud není vyplněna celá klec. Výsledný odlitek je vysoce kvalitní, jelikož nemá pórovitou strukturu.

Je tedy nutné, aby rotorová drážka měla co nejjednodušší tvar pro správné zatékání hliníku. Pokud bude tvar vysoce členitý, může nastat situace, kdy v určitých místech drážky budou vzduchové bubliny snižující efektivní vodivost klece.

Tvarem drážek lze ovlivnit celou řadu parametrů například rozptylové a magnetizační indukčnosti, ztráty v železe, Jouleovy ztráty v kleci a další. Jednotlivé vlastnosti se vzájemně ovlivňují, a proto nelze obecně říci, jaký tvar drážky je nejlepší. Je potřeba zvolit vhodný tvar vyhovující dané aplikaci stroje. Při optimalizaci jsou obvykle používány metody konečných prvků, které vytvoří přibližný tvar optimální drážky. Z technologického hlediska pak musí být provedeny úpravy geometrie pro jednoduchou vyrobiteľnost.[3]

## 3.2 Skinefekt v rotoru

Ve vodičích vznikají působením příčného magnetického pole vířivé proudy, které způsobují nestejnoměrné rozložení proudové hustoty a tím rostou Jouleovy ztráty. Při výpočtech jsou uvažovány zjednodušující předpoklady – nekonečná permeabilita železa, indukční čáry probíhají kolmo na drážkové stěny a rovnoběžně se dnem, teplota je ve všech místech vodiče stejná.[1],[2]

### 3.2.1 Změna činného odporu

V nejjednodušším případě lze uvažovat vodič obdélníkového průřezu o výšce  $h_v$  a šířce  $b$ . Hloubka vniku je vzdálenost, ve které proudová hustota klesne na  $1/e$  násobek maximální hodnoty vlivem skinefektu a lze ji vypočítat podle následujícího vztahu[2]:

$$\alpha = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \gamma}} \quad (3.9)$$

, kde  $\omega$  je kmitočet a  $\gamma$  je vodivost materiálu. Pokud je počítán skinefekt v rotorové kleci, uvažujeme skluzovou frekvenci. Nyní lze vypočítat poměrnou výšku  $\xi$  a funkci  $\varphi$ , která určuje činitel zvýšení odporu  $k_r$  vodiče vlivem skinefektu.[2]

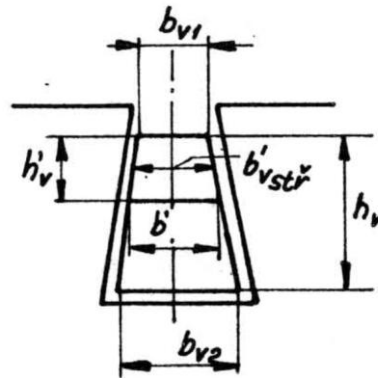
$$\xi = \frac{h_v}{\alpha} \quad (3.10)$$

$$\varphi(\xi) = \xi \cdot \frac{\sinh(2\xi) + \sin(2\xi)}{\cosh(2\xi) - \cos(2\xi)} \quad (3.11)$$

$$k_r = \frac{R_{\sim}}{R} = \varphi(\xi) \quad (3.12)$$

Pokud však chceme uvažovat klínový vodič dle Obrázek 9, bude činitel zvýšení odporu[2]:

$$k_r = \frac{R_{\sim}}{R} = \frac{\frac{1 + \frac{b_{v1}}{b_{v2}}}{2 \cdot \frac{b_{v1}}{b_{v2}}} \cdot \varphi(\xi)}{\frac{1 - \frac{b_{v1}}{b_{v2}}}{2 \cdot \frac{b_{v1}}{b_{v2}}} + \varphi(\xi)} \cdot \varphi(\xi) \quad (3.13)$$



Obrázek 9: Průřez klínovou drážkou (převzato z [2])

Klínový vodič je vhodný pro dosažení většího záběrného momentu při menším záběrném proudu. S rostoucí výškou vodiče  $h_v$  dochází ke zvyšování přídavných proudů a současně i průřezu vodiče. Do určité hodnoty se odpor snižuje, ale při překročení kritické výšky odpor roste a zvyšují se i přídavné ztráty. Máme-li získat kritickou výšku vodiče, při které je efektivní odpor minimální, můžeme vyjít z následujících rovnic. Pokud je poměrná výška  $\xi < 1$ , pak platí[2]:

$$h_{v0} = \alpha \cdot \sqrt{\frac{15 \cdot (1 + \lambda)}{4 + 15 \cdot Q}} \quad (3.14)$$

kde  $\lambda$  vyjadřuje poměr délky čel vinutí vzhledem k aktivní délce vodiče.

Za  $Q$  se dosadí hodnota podle uspořádání vinutí. Pro jednovrstvé vinutí lze dosadit  $Q$  a vyjádřit hloubku vniku jednoduchým vztahem[2]:

$$Q = \frac{m^2 - 1}{3} \quad (3.15)$$

$$h_{v0} = \alpha \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot (1 + \lambda)}{m^2 - 0,2}} \quad (3.16)$$

Pro určení minimálního odporu z obecného vzorce musíme najít minimum funkce  $R$ , což vychází z podmínky pro minimum  $\frac{dR}{dh_v} = 0$ . [2]

Skinefekt lze také vypočítat pomocí metody více vrstev, kdy se rotorová tyč rozdělí na několik částí a poté je počítán proud tekoucí každou vrstvou. Ve výsledku pak dostaneme celkový proud tekoucí tyčí.

U měřeného motoru má však drážka relativně malou hloubku a proto se skinefekt příliš neprojeví. Ani u optimalizovaného rotoru nebude hloubka nové drážky natolik velká, aby se skinefekt projevil, jelikož se jedná o malý stroj a hluboká drážka by způsobila škrcení toku jhem rotoru a jeho následné přesycování.

Měrná vodivost hliníku je  $\rho = 38 \text{ MS} \cdot \text{m}^{-1}$  a relativní permeabilita  $\mu_{r,Al} \doteq 1$ . Můžeme nyní provést výpočet hloubky vniku pro optimalizovaný stroj:

$$\alpha = \sqrt{\frac{2}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 38 \cdot 10^6}} \quad (3.17)$$

$$\alpha = 11,55 \text{ mm}$$

Původní drážka stroje má hloubku 9,1 mm [17]. Maximální teoretická hloubka drážky je 21,4 mm, ale při této hodnotě by již byla velikost jha rotoru nulová. Maximální využitelná hloubka je tedy někde v tomto rozmezí avšak přesnou hodnotu není možné jednoduše určit, jelikož je závislá na rozměrech plechu (jha) rotoru pro splnění mechanických parametrů. Avšak vzhledem k hloubce vniku můžeme konstatovat, že skinefekt bude mít malý vliv na rozložení proudové hustoty v kleci.

### 3.3 Rozptylový tok

Rozptylový magnetický tok je ta část toku vytvořená zdrojem magnetického pole, která se nepodílí na chodu stroje, ale pouze způsobuje ztráty, pulzace momentu a přesycování magnetického obvodu. Z dílčích rozptylových toků vyskytujících se v indukčním motoru se převážně vzduchem uzavírá pouze rozptyl čel. Ostatní rozptylové toky se uzavírají částečně vzduchem a částečně železem, kdy při výpočtech je uvažována velká (až nekonečná) permeabilita materiálu. Tento předpoklad však neplatí při velkých proudech, jelikož se v motoru vyskytnou přesycená místa, ve kterých permeabilita klesá a důsledkem je změna rozptylové reaktance.[2]

Největší nasycení magnetického obvodu rozptylovým tokem nastává převážně v zubech a v uzavření drážek. Pokud je drážka úplně uzavřena jako v případě optimalizovaného motoru, pak je nutno zvolit vhodnou výšku jako kompromis mezi velikostí rozptylového toku, mechanickou pevností, záběrovým proudem/momentem a hlukem.[1],[2]

Natočení drážek snižuje harmonické složky momentu, ale má také negativní vliv na indukčnost. Způsobuje mírné snížení magnetizační indukčnosti a vnáší do modelu novou rozptylovou indukčnost způsobenou natočením. Jelikož je proud klecí stejný po celé délce svazku, fáze magnetomotorického napětí rotoru se mění v závislosti na poloze (natočení). Tato složka rozptylu se projeví především při velkých proudech. [1]

Výpočty odporů a indukčností nebudou v této práci prováděny, jelikož pro optimalizaci drážek je získání analytických hodnot časově náročné a poměrně nepřesné. Simulační program RMXprt má v sobě zakomponované rovnice pro rychlý analytický výpočet. Následné simulace pomocí metody konečných prvků nám dají o něco přesnější výsledky parametrů stroje dle zakreslené geometrie a zadaných vstupních veličin.

### 3.4 Výkonové ztráty v motoru

Ztráty jsou nežádoucím prvkem při provozu strojů, jelikož převádějí užitečnou elektromagnetickou energii na odpadní teplo. Tři hlavní místa tvorby ztrát jsou – vodiče, kde dochází k ohřevu materiálu průtokem elektrického proudu; magnetický obvod, ve kterém vznikají hysterezní a vířivé ztráty; pohyblivé části stroje, kde vznikají ztráty třením.

Příkon motoru  $P_1$  můžeme zapsat vztahem:

$$P_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos(\varphi) \quad (3.18)$$

Pro výkon  $P_2$  platí vztah:

$$P_2 = M \cdot \omega = P_1 - \Delta P_{j1} - \Delta P_{Fe} - \Delta P_{j2} - \Delta P_{mech} - \Delta P_d \quad (3.19)$$

Jouleovy ztráty ve vinutí statoru  $\Delta P_{j1}$  jsou dány odporem vinutí a protékajícím proudem.

$$\Delta P_{j1} = R_{hl} \cdot I_{hl}^2 + R_{pom} \cdot I_{pom}^2 \quad (3.20)$$

Pro Jouleovy ztráty v rotoru  $\Delta P_{j2}$  platí obdobný vztah, avšak pro klecové vinutí je obtížné jednoduše tyto ztráty vypočítat. V tyčích protéká v každém okamžiku jiný proud a kruhy nakrátko teče v různých místech součet různých proudů jednotlivých tyčí. Můžeme však využít vztah pro výpočet rotorových ztrát ze skluzového kmitočtu. Jedná se o součin momentu na hřídeli a skluzového úhlového kmitočtu přepočítaného na mechanickou stranu.[4]

$$\Delta P_{j2} = M \cdot \frac{\omega_{rot,el}}{p} = M \cdot 2\pi \cdot \frac{f_{rot,el}}{p} \quad (3.21)$$

Ztráty v železe  $\Delta P_{Fe}$  jsou obecně dány součtem hysterezních a vířivých ztrát.[4]

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_h + \Delta P_v \quad (3.22)$$

Velikost hysterezních ztrát je dána velikostí hysterezní křivky materiálů a frekvencí napájecího napětí resp. velikostí magnetické indukce. Plocha uzavřená hysterezní křivkou udává energii  $W$  potřebnou k proběhnutí jedné periody střídavého magnetování.[4]

$$\Delta P_h = W \cdot f \sim B_{s,max}^2 \cdot f \sim \left( \frac{U_{1,a}}{f} \right)^2 \cdot f \sim \frac{U_{1,a}^2}{f} \quad (3.23)$$

Budeme-li uvažovat konstantní sycení, pak jsou hysterezní ztráty úměrné napájecí frekvenci. [4]

$$\Delta P_h \sim B_{s,max}^2 \cdot f \sim f \quad (3.24)$$

Pokud však dodržíme konstantní amplitudu napájecího napětí, magnetická indukce bude nepřímo úměrná frekvenci a hysterezní ztráty pak budou úměrné převrácené hodnotě frekvence. [4]



$$\Delta P_h \sim B_{s,max}^2 \cdot f \sim \frac{1}{f^2} \cdot f \sim \frac{1}{f} \quad (3.25)$$

Pro ztráty vířivými proudy platí, že při konstantním syčení jsou úměrné druhé mocnině frekvence napájecího napětí. [4]

$$\Delta P_v = \frac{U_{ef}^2}{R_{ekv}} \sim U_{ef}^2 \quad (3.26)$$

$$\Delta P_v \sim U_{ef}^2 \sim f^2 \quad (3.27)$$

Pro odbuzený motor (změnou frekvence při konstantním napájení) budou naopak úměrné druhé mocnině amplitudy napájecího napětí. [4]

$$\Delta P_v \sim U_{ef}^2 \sim konst. \quad (3.28)$$

Vlivem ztrát motoru se zahřívá magnetický obvod, což může mít negativní vliv na jeho vlastnosti. Avšak znatelné rozdíly se začnou projevovat až při vyšších teplotách (200 °C a více), což je stav, ve kterém se stroj běžně nevyskytuje. Při analytických výpočtech a simulacích se ztráty v železe počítají pomocí koeficientů, které zahrnují vliv výroby a vyšší harmonické složky magnetické indukce. V dnešní době je při výpočtu využíváno rozdělení měrných ztrát v železe [W/kg] na tři složky. První jsou měrné hysterezní ztráty, které závisí na koeficientu ztrát, amplitudě magnetické indukce, frekvenci a druhu materiálu charakterizovaným koeficientem  $\alpha$ . [3],[15],[16]

$$\Delta p_h = K_h \cdot B_{s,max}^\alpha \cdot f \quad (3.29)$$

Dle [16] se v programu Maxwell počítá s koeficientem  $\alpha = 2$ . Obdobný vzorec existuje i pro vířivé a dodatečné měrné ztráty. [16]

$$\Delta p_v = K_v \cdot (B_{s,max} \cdot f)^2 \quad (3.30)$$

$$\Delta p_d = K_d \cdot (B_{s,max} \cdot f)^{1,5} \quad (3.31)$$

Součet těchto tří měrných ztrát poté dá celkové měrné ztráty v železe na jednotku hmotnosti.[3]

$$\Delta p_{Fe} = \Delta p_h + \Delta p_v + \Delta p_d \quad (3.32)$$

Při stříhání plechů jsou ovlivňovány vlastnosti plechu ve vzdálenosti až 5-10 mm od místa stříhu. Změny se projeví v poklesu relativní permeability a zvýšení měrných ztrát v daném místě, především hysterezní složky ztrát. Poškození izolační vrstvy plechu může mít také za následek zvýšení vířivých proudů. Především však ovlivňuje rozložení magnetické indukce a velikost magnetizačního proudu, jelikož při zhoršujících se magnetických vlastnostech materiálů je potřeba silnější magnetické pole pro dosažení stejné indukce.[3],[15],[23]

### 3.5 Optimum účinnosti

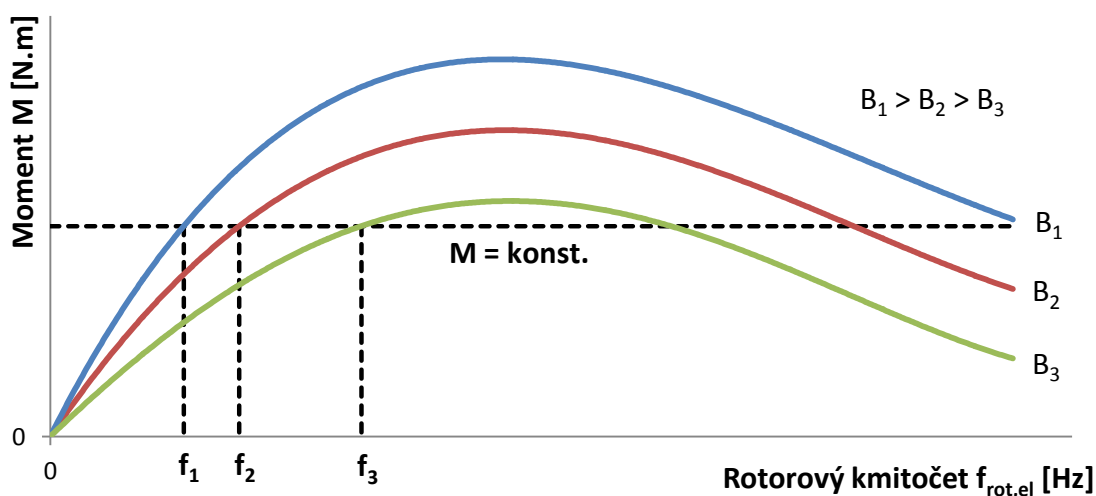
Ztráty v motoru jsou funkcí skluzového kmitočtu a sycení. Na křivce závislosti účinnosti na skluzovém kmitočtu existuje lokální minimum, jehož poloha je dána aktuálním momentem a otáčkami. Provozní parametry motoru je proto vhodné nastavit v závislosti na aktuálním stavu stroje.[4]

Pro nízkootáčkové stroje platí, že statorový synchronní kmitočet bude malý a díky tomu budou ztráty v železe nepatrné vzhledem k celkovým ztrátám. Podle velikosti zatěžovacího momentu bude platit[4]:

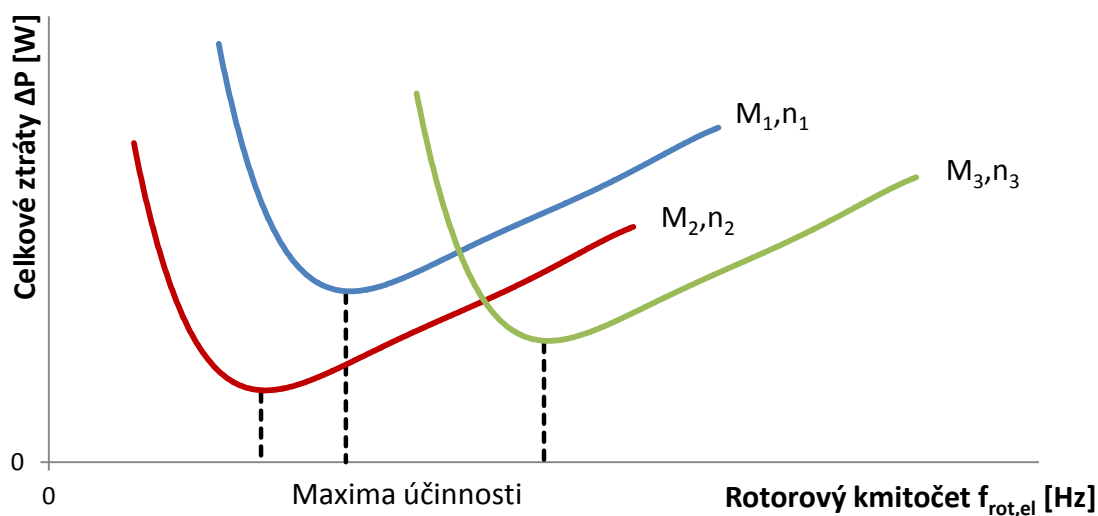
- Pro malou hodnotu momentu (menší než jmenovitý) je vhodné použít vyšší sycení. Dosáhneme tak menšího skluzového kmitočtu a tím se výrazně sníží ztráty v kleci, které při malých otáčkách dominují.
- Pokud se moment pohybuje okolo jmenovité hodnoty, je vhodné stroj provozovat při jmenovitém sycení a skluzovém kmitočtu, aby nedošlo k přesycení a tím i velkému zvýšení magnetizačního proudu.
- Při momentovém přetěžování stroje vznikají velké ztráty ve statoru vlivem magnetizačních proudů při vysokém sycení. Je tedy vhodné zvýšit skluzový kmitočet tak, aby byla docílena požadovaná hodnota momentu (tzn. posunout pracovní bod na momentové charakteristice blíže k momentu zvratu).

Pro vysoké otáčky platí[4]:

- Při nízkém momentu není vhodné volit jmenovité sycení kvůli výrazným ztrátám v železe. Je proto vhodnější stroj odsytit a zvýšit skluzový kmitočet, čímž vzrostou ztráty v rotoru, ale klesnou ztráty v železe.
- Pro velké momenty bude nutné sycení zvýšit.



Obrázek 10: Závislost výsledné rotorové frekvence na velikosti sycení při konst. zátěži [4]



**Obrázek 11: Závislost celkových ztrát na rotorovém kmitočtu pro různé otáčky a zatížení [4]**

Na Obrázek 10 a Obrázek 11 je vidět, že pokud navýšíme sycení při konstantním zatěžovacím momentu, klesá rotorový kmitočet a tím lze velice snadno ovlivnit poměr ztrát v kleci rotoru, v železe a v mědi statoru. Pro různé hodnoty momentů a otáček se maximum účinnosti vyskytuje u různých rotorových kmitočtů. Účinnost je nejvyšší v místě s nejmenšími celkovými ztrátami, kde nalevo od optima převažují ztráty v železe a mědi statoru. Napravo od optima naopak převažují ztráty v kleci rotoru díky velkému rotorovému kmitočtu. Je tedy nutné pečlivě zvolit velikost sycení, jelikož při špatné hodnotě může účinnost rapidně klesat.[4]

## 4 OPTIMALIZAČNÍ METODY

Optimalizace je proces zlepšování parametrů a vlastností určitého objektu. Slouží k nalezení globálního minima účelové funkce, z čehož dostaneme nejlepší možnou konfiguraci prvků objektu. Jsou známy matematické postupy pro nalezení extrému funkcí, u kterých existuje první a druhá derivace. Mohlo by se proto zdát, že nalezení globálního minima je jednoduchá úloha. Bohužel tomu tak není, jelikož účelová funkce může mít jedno či více lokálních minim, nebo je argument funkce vektor reálných čísel (více proměnných). Také není zaručeno, že každá funkce je diferencovatelná, ale i přesto je třeba její extrém nalézt.[5],[8],[20]

Optimalizační algoritmy se dělí do několika kategorií:

### **Enumerativní**

Jedná se o proces, kdy měníme proměnné systému, aniž bychom věděli více o jeho chování. Náhodnými změnami proměnných získáváme výstupní hodnoty, které jsou na konci optimalizace setříděny, a je vybrána nejlepší varianta. Tato metoda je časově velmi náročná, jelikož jsou vyhodnocovány všechny kombinace proměnných. Pokud není uvažováno dostatečně podrobné vzorkování, je možné, že nebude globální minimum nalezeno. Tato metoda je proto vhodná na řešení problému s malým počtem hodnot nebo tam, kde je argument účelové funkce diskrétního charakteru.[5],[7]

### **Deterministické**

Neprovádějí výpočet všech možných kombinací daného problému na rozdíl od enumerativních metod, ale vyžadují předběžné předpoklady jako např. spojitý prostor možných řešení, jeden extrém účelové funkce, linearitu. [5]

### **Stochastické**

Tyto metody nemohou garantovat nalezení řešení v konečném počtu kroků, ale jsou určeny k nalezení použitelného řešení v přijatelném čase. Heuristicky prohledávají zadaný prostor, čímž se rozumí postup, ve kterém se využívá náhoda, analogie, intuice. Oproti deterministickému algoritmu v sobě tyto algoritmy obsahují proces učení. Většina stochastických algoritmů pracuje současně s více kandidáty řešení. Ty vytvářejí skupinu, která se mění, pohybuje a přitom nachází lepší kandidáty. [5],[7]

Většinou jsou využívány stochastické algoritmy založené na fyzikálních a biologických principech. Připouštějí i přijetí horšího řešení do další generace a tím je eliminováno riziko uváznutí v lokálním extrému. [5]

## **Smíšené**

Jsou schopny nalézt více řešení během jednoho spuštění, jelikož kombinují deterministické a stochastické algoritmy. Jsou proto vhodné pro prohledávání neomezeného prostoru. [7]

### **4.1 Evoluční algoritmy**

Patří do skupiny stochastických algoritmů a jejich základ je odvozen z principů biologické evoluce a Darwinovy evoluční teorie vývoje populací. Pracují s populací, která se v průběhu hledání vyvíjí pomocí aplikace evolučních operátorů. Nejdůležitější operátory jsou tyto[8]:

- Selektce – silnější jedinci mají větší pravděpodobnost přežití a také mají větší šanci na předání genetických vlastností dalším generacím (potomkům)
- Křížení – proběhne výměna informací mezi dvěma nebo více členy populace a vzniknou tak noví jedinci kombinující vlastnosti rodičů
- Mutace – náhodné modifikace informací, které jsou zakódované v jedinci
- Migrace – vzájemné ovlivňování několika paralelně existujících populací

Jejich výhoda spočívá v tom, že jsou velmi obecně definované a proto se dají aplikovat na různé problémy. Mají také schopnost dostávat se z lokálních extrémů, jelikož připouštějí i horší řešení v rámci optimalizačního cyklu. Nevýhodou je, že pracují do určité míry s náhodou a není tudíž možné jejich výsledky předvídat. Poskytují však řadu možných řešení daného problému a volba výsledného řešení je ponechána na uživateli. Jednotlivé typy evolučních algoritmů se liší především ve způsobu prohledávání prostoru řešení. Je potřeba co nejrychleji nalézt optimum řešeného problému a zároveň co nejlépe prohledat všechna možná řešení.[5],[19],[20]

Různé evoluční algoritmy se budou chovat odlišně v závislosti na typu a složitosti řešené úlohy. Časová náročnost algoritmů a správnost řešení jsou hlavní kritéria pro výběr vhodného typu algoritmu. Není však jednoduché říci, který typ vybrat pro danou úlohu, jelikož je jejich chování těžko předvídatelné. A nemůžeme spoléhat ani na to, že stochastické algoritmy vyřeší jakoukoliv úlohu. Rychlost a přesnost výpočtů může být zvýšena vhodnou volbou řídicích parametrů. Avšak před započítáním optimalizace nemůžeme vědět, které hodnoty budou nejvhodnější. Dají se proto použít adaptivní algoritmy, které si mění hodnoty řídicích parametrů samy a dosahují tak vyšší účinnost pro širší třídu optimalizačních problémů. [8],[20]

### 4.1.1 Genetický algoritmus

Genetický algoritmus je optimalizační technika na bázi genetiky a přirozeného výběru. Od svého vzniku v 70. letech představují zdroj informací pro další evoluční algoritmy, zkoumání umělé inteligence a v dnešní době je jeden z nejpoužívanějších optimalizačních algoritmů. Funguje na principu Darwinovy teorie přirozeného výběru a vývoje populace, která je složená z mnoha proměnných dle specifikovaných pravidel a vyhodnocuje se její „fitness“ úroveň (minimalizace „cost“ funkce). Fitness funkce může být chápána jako relativní schopnost přežití a reprodukce genotypu jedince. Může to být matematická funkce, podle které jsou evaluovány výstupy systému a určen nejvhodnější člen populace. Jedinci s vyšší „fitness“ (nižší „cost“) funkcí mají větší pravděpodobnost přežití a reprodukce svých genů do generace potomků.[5],[8]

Například pokud je snaha nalézt v mapě bod s nejvyšší nadmořskou výškou, budou vstupní proměnné souřadnice  $x$  a  $y$ . Vyhodnocovací funkce „cost“ pak bude záporná hodnota nadmořské výšky pro daný bod mapy. Nejlepší řešení bude to, které bude mít nejmenší hodnotu „cost“ funkce. [5]

$$cost = -f_{nadmořská\_výška}(x, y) \quad (4.1)$$

Tato metoda byla vyvinuta Johnem Hollandem kolem roku 1975 a nyní je čteně využívána. Její hlavní výhody spočívají v tom, že[5]:

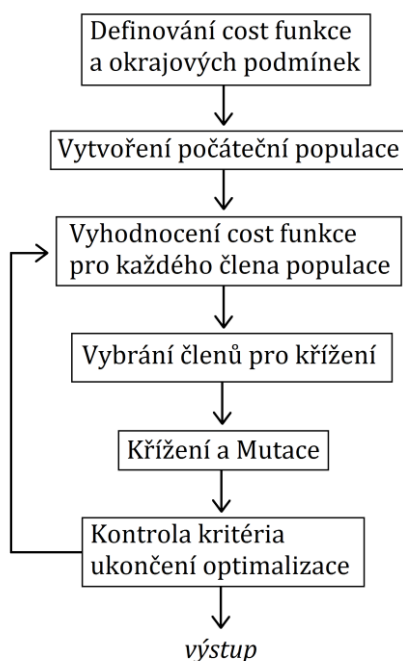
- Optimalizuje spojitě i diskrétní hodnoty
- Nepotřebuje informace ohledně derivace funkce
- Počítá s velkým množstvím proměnných
- Poskytuje seznam několika vhodných řešení, ne pouze jedno

Výpočet genetického algoritmu probíhá cyklicky v krocích[9]:

- 1) Inicializace – dojde k náhodnému vytvoření populace o daném počtu členů, kdy každý člen je vektor o určitém počtu proměnných (genů). Pokud bychom chtěli zaručit, že populace bude vytvořena rovnoměrně z celého rozsahu možných řešení, je vhodné celý řešený prostor rozdělit na několik částí a z nich poté rovnoměrně vybrat jednotlivé členy.
- 2) Evaluace „cost“ funkce – pro každého člena populace je vyhodnocena velikost „cost“ funkce dle zadaného kritéria
- 3) Selektce – seřazení populace podle velikosti „cost“ hodnot a vybrání nejlepší části populace, která předá genetickou informaci svým potomkům. Zbytek populace je odstraněn.
- 4) Křížení silných členů populace – dle zvolené metody (ruletová, náhodná, váhování,...) jsou vybráni dva nebo více členů populace. Vybraní členové

poté vytvoří nového potomka, který nese geny (části chromozomů) obou rodičů. Toto se opakuje, dokud není počet členů populace stejný jako na začátku cyklu.

- 5) Mutace – náhodné změny genetického kódu jedinců
- 6) Opakování kroků 2) až 5) dokud není splněno některé z kritérií pro ukončení optimalizace. Výstupem jsou členové populace, kteří se nejvíce přiblížili požadované hodnotě (globálnímu minimu) dané evaluačním kritériem.



Obrázek 12: Flowchart Genetického Algoritmu [5]

### Ruletový výběr

Je to jednoduchý způsob jak zajistit, aby byli silnější jedinci v populaci vybíráni častěji pro vytvoření potomků, než slabší jedinci. Pravděpodobnost pro výběr jedince může být určena buďto na základě jeho „cost“ hodnoty, nebo jeho pořadí v populaci, které je dáno právě dle jejich „cost“ hodnot.[7]

Váhování podle pořadí je jednodušší, jelikož se vychází pouze z uspořádání populace. Ať jsou rozdíly mezi „cost“ hodnotami jakékoliv, pravděpodobnost výběru jedince  $P_n$  na tomto nebude nikterak závislé.  $N_{keep}$  je počet nejsilnějších členů populace, kteří jsou ponecháni pro další generace. Zbytek populace je odstraněn.[7]

$$P_n = \frac{N_{keep} - n_{člen} + 1}{\sum_{n=1}^{N_{keep}} n_{člen}} \quad (4.2)$$

Kumulativní pravděpodobnost je součet pravděpodobností jednotlivých členů, kdy celkový rozsah poté bude od 0 do 1.[7]

$$P_i = \sum_{n=1}^n P_n \quad (4.3)$$

Pro jednoduchou představu je v následující tabulce uveden příklad pro přeživší členy populace, ze kterých bude následně vytvořena další generace. Členové pro křížení jsou vybíráni tak, že je generováno číslo v rozsahu 0-1 a pro číslo například 0,82, je vybrán 3. člen, jelikož toto číslo leží v intervalu 0,7-0,9. Někteří členové mohou být vybráni pro párování vícekrát a někteří vůbec.

**Tabulka 1: Ruletová selekce - příklad váhování podle pořadí**

n <sub>člen</sub>	P <sub>n</sub>	P <sub>i</sub>
1	0,4	0,4
2	0,3	0,7
3	0,2	0,9
4	0,1	1,0

Může nastat situace, kdy je člen spárován sám se sebou. To lze vyřešit buďto tak, že necháme křížení proběhnout a v následující generaci bude tento člen 3x. Druhá možnost je náhodně vybrat jiný člen pro křížení. A třetí možnost je vybrat člen podle stejného váhovacího postupu avšak podmínkou je zamezit vybrání stejného členu.[7]

Druhý způsob je váhování podle velikosti „cost“ funkce. To je vypočítáváno z hodnoty „cost“ funkce každého členu populace. Princip je totožný jako u vybírání podle pořadí. Nejprve je však odečtena hodnota prvního členu odstraněné části populace, aby bylo zajištěno, že všechny hodnoty pro vyhodnocování jsou záporné.[7]

$$C_n = cost_n - cost_{N_{keep}+1} \quad (4.4)$$

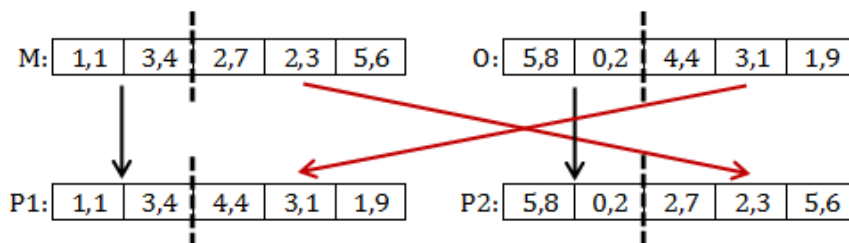
$$P_n = \frac{C_n}{\sum_m^{N_{keep}} C_m} \quad (4.5)$$

Výhoda spočívá v tom, že pokud jsou hodnoty přibližně stejné, je pravděpodobnost výběru těchto členů podobná. Naopak pokud se „cost“ hodnoty výrazně liší, jsou pro selekci preferováni členové s co nejlepším hodnotou.[7],[9]



## Křížení

Nejjednodušší metoda spočívá v náhodném výběru místa křížení v chromozomu. V tomto místě je rozdělen chromozom obou rodičů a křížovým prohozením jednotlivých částí vzniknou dva potomci nesoucí část kódu matky a část otce.[7],[8]



Obrázek 13: Příklad křížení genetického algoritmu

Nevýhoda spočívá v tom, že není do genetického kódu vnesena žádná nová informace. Tento způsob je vhodný pro binární genetické algoritmy, ale pro spojitě hodnoty je dobré pozměnit některé hodnoty následujícím vzorcem, který vytvoří novou hodnotu z chromozomu matky a otce.[7]

$$x_{nové} = \beta \cdot (x_{n,M} - x_{n,O}) + x_{n,M} \quad (4.6)$$

, kde  $\beta$  je náhodné číslo z intervalu 0-1,  $x_{n,M}$  a  $x_{n,O}$  jsou hodnoty části chromozomu v daném místě (např. v místě křížení). Výhoda spočívá v tom, že nové hodnoty mohou nabývat velikosti větší než hodnoty rodičů. Tím se algoritmus může dostat z lokálních minim.[7]

## Mutace

Je náhodná změna hodnoty části chromozomu. Zajišťuje získání nové genetické informace do již existující populace a tím se může dostat z oblasti lokálního minima, ke kterému by algoritmus směřoval, pokud by bylo užíváno pouze jednoduché křížení. Bude-li však mutace užívána příliš, genetický algoritmus se začne chovat jako náhodný prohledávač a tím by ztratil svůj smysl. Obvykle je užívána četnost mutace 20 %, což znamená, že v každé populační generaci dojde k mutaci 1/5 hodnot. Pouze hodnoty nejsilnějšího člena populace nejsou pozměňovány, aby nebyla ztracena jeho informace. [7],[8],[20]

## 5 ROZBOR PARAMETRŮ MOTORU

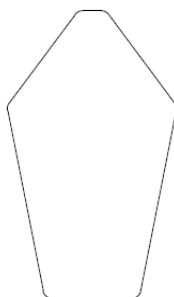
### 5.1 Analyzovaný stroj

Jedná se o malý jednofázový asynchronní motor (J22VV506), který vyrábí firma ATAS elektromotory Náchod a.s. Jde o dvoupólový stroj se jmenovitým výkonem 550 W. Hodnota jmenovitého napětí pro 50 Hz je na štítku uvedena jako rozsah 220-240 V. K pomocnému vinutí má být připojen kondenzátor o kapacitě 16  $\mu\text{F}/400 \text{ V}_{\text{AC}}$ . Jmenovité otáčky stroje jsou pak 2650  $\text{min}^{-1}$ .

Tabulka 2: Štítkové hodnoty měřeného motoru

$U_1$	$I_1$	f	$n_n$	$P_1$	$P_2$	C	Krytí
[V]	[A]	[Hz]	$[\text{min}^{-1}]$	[W]	[W]	$[\mu\text{F}]$	[-]
220-240	4,1	50/60	2650/3270	880	550	16	IP54

Magnetický obvod (statorový i rotorový) je složen z plechů M700-50A. Klec rotoru je odlévána z materiálu AlSi12Mn (ČSN 42 4330) s rezistivitou 0,05  $\mu\Omega\text{m}$  při 20 °C. Rohy rotorové drážky jsou zaobleny. Přesné rozměry stroje a provedení vinutí však nemůže být zveřejněno, jelikož se jedná o stále vyráběný stroj.



Obrázek 14: Tvar rotorové drážky měřeného stroje



Obrázek 15: Měřicí pracoviště

## 5.2 Měření jednofázového motoru J22VV506

Nejprve byly změřeny odpory vinutí za studena (22,6 °C), poté byly zaznamenány velikosti veličin při maximálním záběrovém momentu - napájení plným napětí při nulových otáčkách. Následovalo měření parametrů ve jmenovitém bodě, kdy bylo nejprve potřeba nechat ustálit teplotu motoru. Nakonec byla proměřena zatěžovací charakteristika do 2,5 Nm a záběrový moment zatepla.

**Tabulka 3: Naměřené hodnoty při zkoušce záběrového momentu - zastudena**

$M_0$	$U_1$	$I_1$	$\varphi$	$P_1$	$\cos(\varphi)$	$I_{pom}$	$\varphi_{pom}$	$I_{hl}$	$\varphi_{hl}$
[Nm]	[V]	[A]	[°]	[W]	[-]	[A]	[°]	[A]	[°]
1,19	230,3	11,21	25,31	2335	0,904	1,29	-81,12	11,64	31,41

**Tabulka 4: Naměřené hodnoty při zkoušce záběrového momentu - zatepla**

$M_0$	$U_1$	$I_1$	$\varphi$	$P_1$	$\cos(\varphi)$	$I_{pom}$	$\varphi_{pom}$	$I_{hl}$	$\varphi_{hl}$
[Nm]	[V]	[A]	[°]	[W]	[-]	[A]	[°]	[A]	[°]
1,23	230,4	10,03	23,09	2126	0,920	1,28	-79,72	10,39	30,01

Při zkouškách byly proměřovány i odpory vinutí. Hodnoty odporů při teplotě okolí 22,6 °C jsou zapsány v prvním a druhém řádku Tabulka 5. V dalších řádcích jsou již zaznamenány odpory při teplotě okolí 24,5 °C, jelikož vlivem odporového disipátoru připojeného na dynamometr docházelo k ohřevu vzduchu. Hodnoty oteplení v tabulce udávají střední oteplení vinutí vůči teplotě 20 °C. Při srovnání záběrných momentů lze vidět, že hodnota zatepla je vyšší o 0,04 Nm díky většímu odporu klece. Teplotu klece nelze jednoduše určit, avšak může být porovnáno oteplení statorového vinutí, kdy v zahřátém stavu je hodnota hlavního o 70 K a hodnota pomocného o 48 K vyšší než za studeného stavu.

**Tabulka 5: Odpory a oteplení vinutí při měření**

	$R_{hl}$	$\Delta\theta_{hl}$	$R_{pom}$	$\Delta\theta_{pom}$
	[Ω]	[K]	[Ω]	[K]
odpor při teplotě okolí (22,6°C)	3,815	2,6	8,002	2,6
odpor po rozběhu maximálním momentem	4,357	39,2	8,527	19,5
odpor v ustáleném stavu po otepl. zkoušce	4,649	58,9	9,610	54,4
odpor po zatěžovací zkoušce	4,597	55,4	9,576	53,3
odpor po zkoušce nakrátko zatepla	4,848	72,4	9,492	50,6

Jmenovitý bod byl měřen podle štítkových hodnot. Zatěžovací moment dynamometru byl nastaven na 1,982 Nm a v ustáleném stavu pak byly výsledné veličiny několikrát změřeny a zprůměrovány. Z Tabulka 6 můžeme vidět, že jmenovité otáčky jsou mírně nižší než je udávaná štítková hodnota, což může být

dáno nižším sycením, jelikož je stroj napájen 230 V. Na štítku je udávána maximální hodnota napájecího napětí 240 V.

**Tabulka 6: Měření jmenovitého bodu motoru ATAS J22VV506**

$n_n$	M	$U_1$	$I_1$	$\varphi$	$P_1$	$\cos(\varphi)$	$I_{pom}$	$\varphi_{pom}$	$I_{hl}$	$\varphi_{hl}$
$[\text{min}^{-1}]$	$[\text{Nm}]$	$[\text{V}]$	$[\text{A}]$	$[\text{°}]$	$[\text{W}]$	$[-]$	$[\text{A}]$	$[\text{°}]$	$[\text{A}]$	$[\text{°}]$
2632,7	1,981	230,6	3,99	23,36	844	0,918	1,71	-44,13	3,69	48,76

Během měření byl také snímán celkový odebíraný proud a proud tekoucí pomocným vinutím. Proud hlavním vinutím byl poté dopočítán z naměřených proudů. Pro správný výpočet je potřeba znát nejen jejich amplitudy, ale také jejich fázové posuvy, jelikož jeden je induktivního charakteru a druhý kapacitního.

$$I_{hl} \angle \varphi_{hl} = I_1 \angle \varphi - I_{pom} \angle \varphi_{pom} \quad (5.1)$$

$$I_{hl} \angle \varphi_{hl} = 3,987 \angle 23,36 - 1,714 \angle -44,13 = 3,688 \angle 48,76 \text{ A} \quad (5.2)$$

Pomocí dynamometru pak byla proměřena i zatěžovací charakteristika od zatížení 2,5 Nm až do stavu naprázdno.

**Tabulka 7: Měření zatěžovací charakteristiky**

n	M	$U_1$	$I_1$	$\varphi$	$P_1$	$\cos(\varphi)$	$I_{pom}$	$\varphi_{pom}$	$I_{hl}$	$\varphi_{hl}$
$[\text{min}^{-1}]$	$[\text{Nm}]$	$[\text{V}]$	$[\text{A}]$	$[\text{°}]$	$[\text{W}]$	$[-]$	$[\text{A}]$	$[\text{°}]$	$[\text{A}]$	$[\text{°}]$
2471,1	2,51	230,6	4,98	19,83	1081	0,941	1,62	-45,25	4,54	38,70
2620,4	2,02	230,6	4,06	23,01	862	0,921	1,71	-44,21	3,75	47,90
2733,1	1,52	230,6	3,35	28,81	677	0,876	1,77	-44,02	3,30	59,70
2825,1	1,03	230,7	2,82	37,56	515	0,793	1,83	-44,45	3,14	72,80
2903,5	0,52	230,7	2,51	50,02	372	0,643	1,88	-45,19	3,27	84,95
2974,3	0,02	230,7	2,47	64,98	241	0,423	1,93	-46,03	3,64	94,65

**Tabulka 8: Účinnost stroje při zatížení**

n	M	P	$P_1$	$\eta$
$[\text{min}^{-1}]$	$[\text{Nm}]$	$[\text{W}]$	$[\text{W}]$	$[\text{°}]$
2471,1	2,51	651	1081	60,2
2620,4	2,02	554	862	64,3
2632,7	1,98	546	844	64,7
2733,1	1,52	436	677	64,3
2825,1	1,03	304	515	59,0
2903,5	0,52	159	372	42,9
2974,3	0,02	6	241	2,6

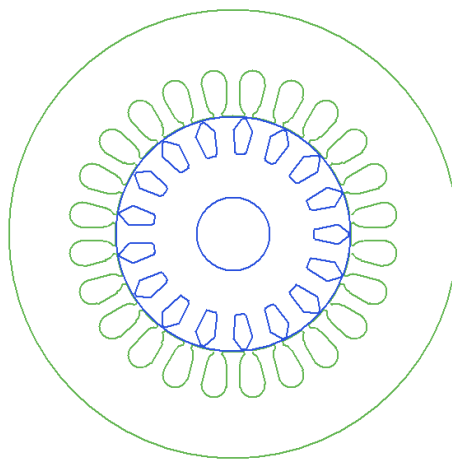
V Tabulka 8 byly dopočítány účinnosti stroje v jednotlivých pracovních bodech. Můžeme vidět, že stroj je navržen tak, aby účinnost byla nejvyšší okolo jmenovitého bodu (64,7 %). Proto je tedy výhodné provozovat stroj na jmenovité parametry. Oproti třífázovým asynchronním motorům je účinnost poměrně nízká, ale zato má ve jmenovitém bodě vysoký účinník (0,918).

### 5.3 Simulace motoru pomocí programu ANSYS Maxwell

Tento program je využíván k řešení 2D a 3D elektrických a magnetických polí pomocí metody konečných prvků (FEM), což je numerická metoda založená na rozložení spojitého prostředí na konečný počet podoblastí. Vznikne tak síť bodů, ve kterých jsou hledány neznámé parametry řešení pomocí diferenciálních rovnic. Hustota a topologie sítě ovlivňuje kvalitu výsledků a dobu výpočtu. Výsledkem simulace jsou pak velikosti momentů, sil, indukčností a dalších veličin charakterizující stroj. Lze také zobrazit rozložení magnetického pole a tím nalézt místa, ve kterých dochází například k přesycování materiálu.[6],[16]

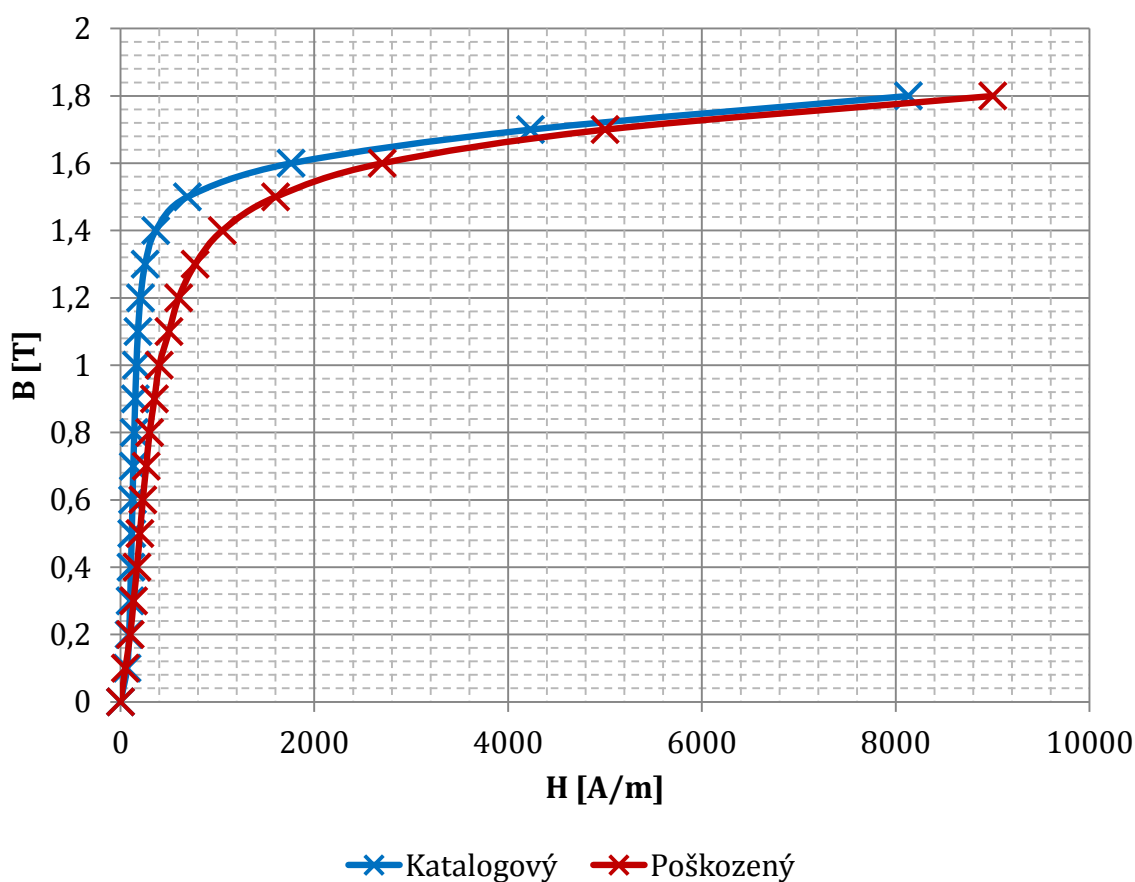
Program Maxwell obsahuje také software Rmxprt, který slouží k analytickým výpočtům parametrů točivých strojů. Oproti metodě konečných prvků je rychlejší, jelikož výpočet probíhá analyticky a tím umožňuje rychlé vyhodnocování. Jeho hlavní nevýhoda však spočívá v jednoduchém způsobu výpočtu, kdy nejsou zahrnovány všechny vlivy (např. vyšší harmonické složky). Také jsou omezeny možnosti zadávání geometrie, materiálů a dalších simulačních vstupů. Práce v Rmxprt probíhá obdobně jako v ostatních simulačních programech. Nejprve je vytvořen model (geometrie, materiály, vinutí, napájení,...), poté jsou simulovány parametry motoru pro konkrétní nastavení modelu a následně jsou vyhodnoceny výsledky.[16]

Model motoru byl sestaven podle dostupné výkresové dokumentace. Rotorová klec je vyrobena ze slitiny AlSi12Mn, která má oproti standardnímu hliníku vyšší rezistivitu.

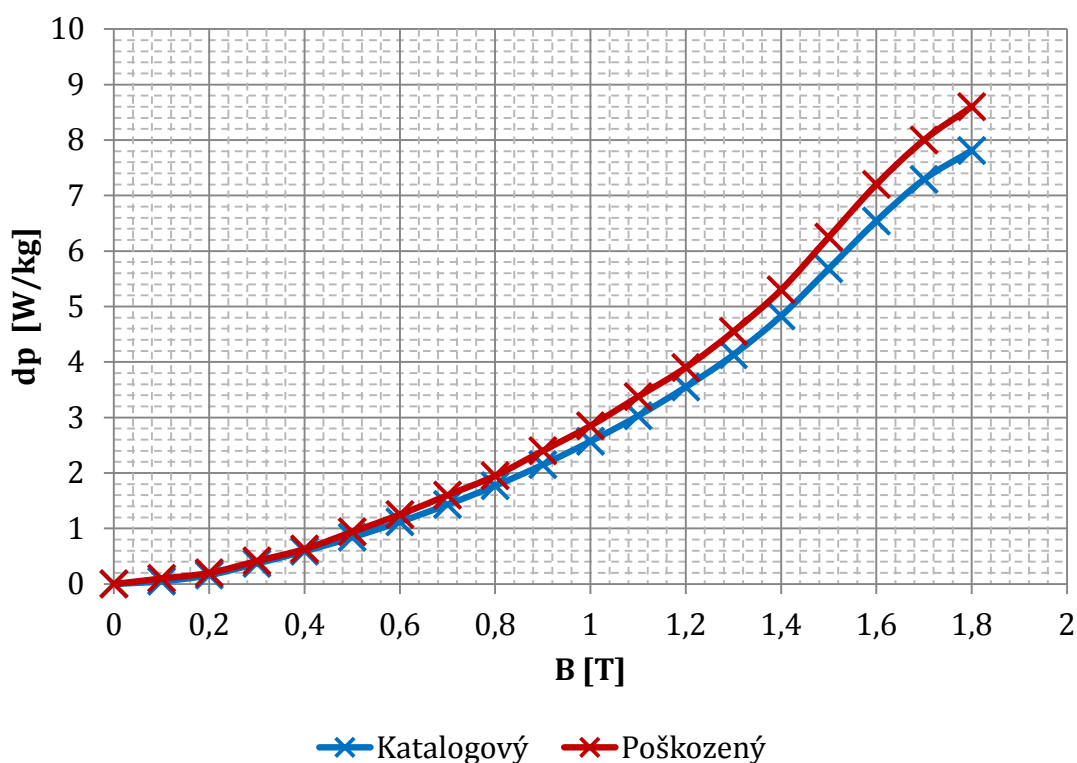


Obrázek 16: Model jednofázového asynchronního motoru v programu Rmxprt

V modelu byly uvažovány dvě magnetizační a ztrátové křivky plechu M700-50A. První je standardní dle katalogu firmy Cogent [5]. Výrobci však v katalogu uvádějí hodnoty, které se vlivem tolerancí a výrobního procesu mohou lišit od reálných parametrů. Největší vliv má na vlastnosti materiálu stříhání, kdy na hranách dochází k degradaci díky vysokému tlaku a materiálové změny mohou být patrné až do vzdálenosti 10 mm od místa stříhu. Jelikož má optimalizovaný stroj malé rozměry a šířka zubů je přibližně 5 mm, bude v simulacích uvažován druhý upravený materiál, který má ponížené parametry vlivem stříhání, lisování a dalších úkonů výrobního procesu. Na Obrázek 17 můžeme vidět, že poškozený plech se odlišuje převážně v koleni magnetizační charakteristiky. Ztrátová křivka je vyšší v celém rozsahu magnetické indukce (Obrázek 18). V oblastech blízko hran plechu je horší magnetická vodivost, což má za následek snížení indukce. V nepoškozených oblastech naopak indukce vzroste, budeme-li uvažovat konstantní magnetický tok. [3],[23]



Obrázek 17: Magnetizační charakteristika plechu M700-50A (převzato z [3])



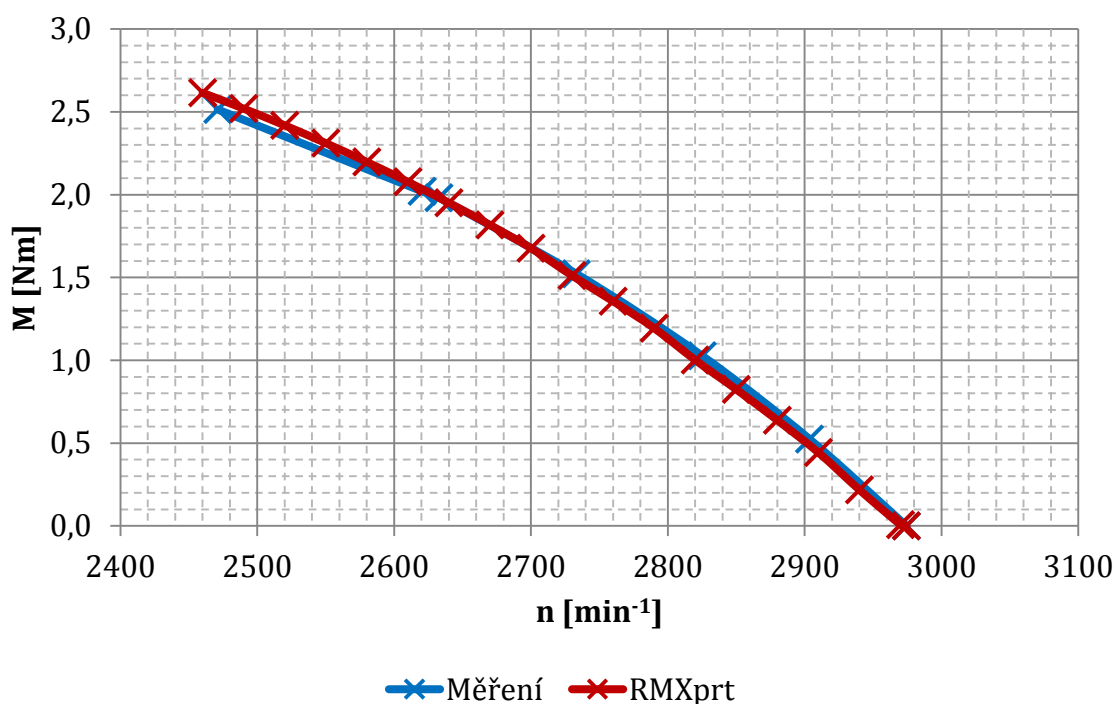
Obrázek 18: Křivka měrných ztrát plechu M700-50A (převzato z [3])

Jelikož nelze v programu RMxpert zadat materiály jednotlivým částem magnetického obvodu, bude v celém stroji uvažován poškozený plech. Simulované parametry se pak více blíží naměřeným hodnotám. Momentová křivka v pracovní oblasti téměř přesně odpovídá naměřenému průběhu, což můžeme vidět v grafu níže (Obrázek 19). Model byl sestaven dle dostupných výkresů a schémat. Pracovní teplota vinutí, která je zadávána do nastavení analýzy byla z měření vypočtena na 82 °C. Rezistivita materiálu klece pak byla přepočítána na takové oteplení, aby simulovaná a měřená charakteristika seděly v naměřeném jmenovitém bodě (2632 min<sup>-1</sup> a 1,981 Nm). Rezistivita při 20 °C je 0,05 μΩ.m a do simulace byla zadána hodnota 0,08304 μΩ.m. Teplotní součinitel elektrického odporu pro hliník je 1/255 K<sup>-1</sup> [28],[29]. Z tohoto pak můžeme vypočítat střední oteplení klece.

$$\Delta\vartheta_{klec} = \left( \frac{\rho_{\Delta\vartheta}}{\rho_{20}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\alpha_{Al}} \quad (5.3)$$

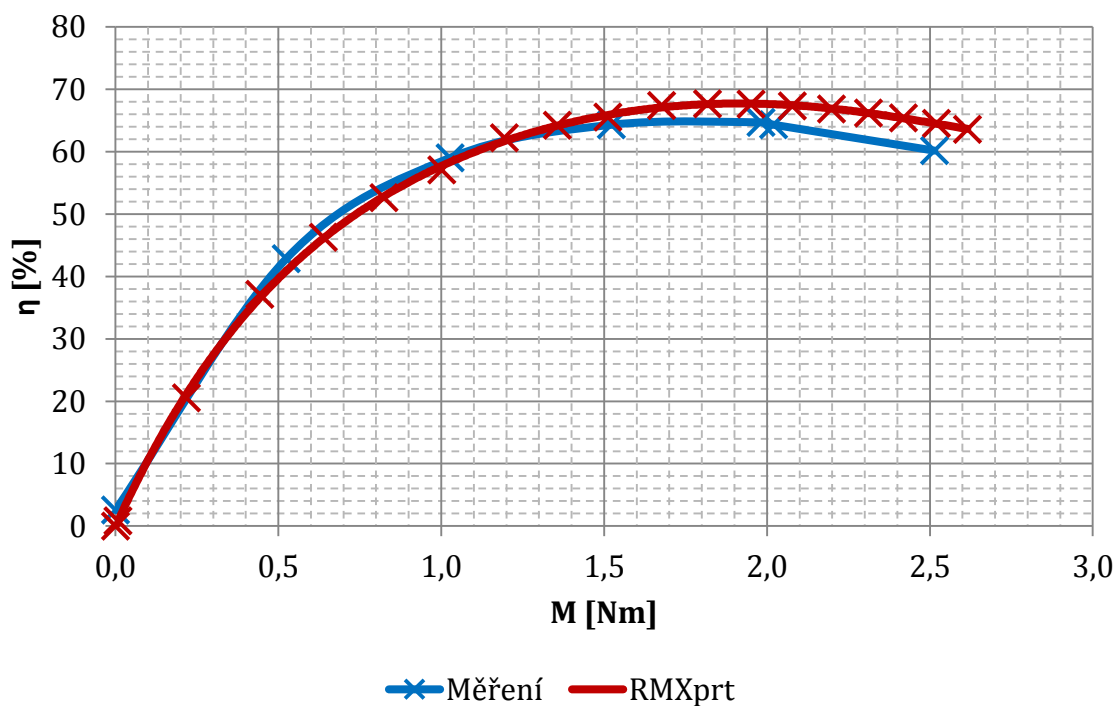
$$\Delta\vartheta_{klec} = \left( \frac{0,08304}{0,05} - 1 \right) \cdot 255 = 168,5 \text{ K} \quad (5.4)$$

Tato hodnota je poměrně vysoká a u měřeného stroje bude pravděpodobně nižší. Vzhledem však ke shodě výsledků simulace a měření ve jmenovitém bodě bude i nadále počítáno s tímto oteplením.



Obrázek 19: Porovnání momentové charakteristiky měření a simulace

Simulovaná křivka účinnosti v závislosti na zátěži také přibližně odpovídá naměřenému průběhu (Obrázek 20). Pro nízké hodnoty zátěže je shodná, při zátěži nad 1,5 Nm se již hodnoty rozcházejí a simulovaná účinnost je až o 4 % vyšší. To je způsobeno nepřesným výpočtem ztrát, převážně v železe a kleci.



Obrázek 20: Porovnání účinností měření a simulace v závislosti na zatěžovacím momentu



V Tabulka 9 můžeme vidět srovnání ztrát měření a simulace. Celkové ztráty jsou u reálného motoru ve jmenovitém bodě o 44 W vyšší. Simulace tedy počítá příliš optimisticky i při zadání zhoršených vlastností materiálu plechu. Jouleovy ztráty ve vinutí statoru jsou srovnatelné s rozdílem pouze 8 W. Mechanické ztráty mají stejnou hodnotu, jelikož byla do simulace tato hodnota pro jmenovitý bod zadávána. Největší rozdíl je však v součtu ztrát v železe, kleci rotoru, kondenzátoru a dodatečných. Jelikož odpor kondenzátoru nebyl měřen, nemůžou být jeho ztráty vypočítány, ale budeme předpokládat, že jsou shodné s hodnotou v simulaci. Jouleovy ztráty v rotoru, ztráty v železe a dodatečné ztráty nelze jednoduchým způsobem rozdělit bez znalosti jednotlivých veličin náhradního schématu. Můžeme porovnat jejich součet, ale je třeba brát v potaz, že program RMxpert s dodatečnými ztrátami nepočítá. U měřeného stroje je součet těchto ztrát o 52 W vyšší. Je pravděpodobné, že v reálném stroji se vyskytují ztráty tvořené vyššími harmonickými. Tyto dodatečné ztráty pak způsobují přesycování, pulzaci momentu, vyšší harmonické složky indukovaného napětí a proudu. V simulaci by byla možnost dosáhnout stejné ztráty například zhoršením ztrátové křivky plechů a tím zvýšení ztrát v železe. Avšak aby byly celkové ztráty podobné měřeným, musela by být křivka ztrát několikanásobně vyšší oproti výrobcem udávaným hodnotám. Pro optimalizaci drážek a případné další úpravy motoru jsou však tyto nasimulované hodnoty dostatečné, jelikož bude vyhodnocována relativní změna veličin (zvýšení/snížení momentu, účinnosti, proudu,...).

**Tabulka 9: Porovnání parametrů a ztrát ve jmenovitém bodě**

		Měření	Simulace
$I_{hl}$	[A]	3,69	3,79
$R_{hl}$	[Ω]	4,649	4,679
$I_{pom}$	[A]	1,71	1,8
$R_{pom}$	[Ω]	9,61	9,876
$\Delta P$	[W]	297,8	254,1
$\Delta P_{j1}$	[W]	91,4	99,2
$\Delta P_{mech}$	[W]	15,9	15,8
$\Delta P_{Fe}$	[W]	190,5	32,3
$\Delta P_{j2}$	[W]		100,2
$\Delta P_{Cond}$	[W]		6,5

Můžeme také porovnat záběrný moment měření a simulace, jelikož je to jedno z kritérií, které bude při optimalizaci vyhodnocováno. Naměřená hodnota při zahřátí motoru na provozní teplotu byla 1,23 Nm. Hodnota získaná ze simulace je o 14,6 % vyšší (1,41 Nm), jelikož byla vodivost klece a tím i momentová

charakteristika sladěna s měřením na jmenovitý bod. Pro optimalizaci drážek je však tento rozdíl zanedbatelný, jelikož bude vyhodnocována poměrná změna momentu vůči původní hodnotě.

### 5.3.1 Simulace různých úprav rotoru

Jelikož je doba jedné simulace v programu RMxprt poměrně krátká, byl zjišťován vliv změny tvaru drážky na parametry stroje. Nejprve byla provedena změna šířky středu drážky  $b_{s1}$  původního stroje. Z Tabulka 10 můžeme vidět, že při zvětšování šířky rychle klesá účinnost. Teoreticky by se účinnost měla zlepšovat, jelikož je zvětšována plocha drážky, tím zmenšován odpor klece a měly by klesnout Jouleovy ztráty. Avšak díky tomu, že jsou zuby rotoru užší, dochází k výraznému přesycování (2,2 T při +2 mm), zvýšení magnetizačního proudu, tím Jouleovy ztráty vzrostou a účinnost klesá. Naopak pokud budeme šířku drážky zmenšovat, odpor klece roste a tím roste záběrný moment. Účinnost zůstává přibližně stejná, jelikož sycení zubů rotoru klesá a tím se snižuje statorový proud. Jouleovy ztráty v kleci jsou závislé na skluzovém kmitočtu, a jelikož otáčky klesají, skluzový kmitočet roste a tím ztráty vzrůstají. Je však nutno říci, že při této i následujících simulacích je uvažována konstantní teplota vinutí statoru a klece rotoru, jelikož program RMxprt neumožňuje adaptivní změnu teplot v závislosti na simulovaných ztrátách a ruční přepočítávání by bylo časově náročné. Je tedy pravděpodobné, že budou simulované výsledky počítány s malou nepřesností.

Tabulka 10: Změna parametrů stroje v závislosti na střední šířce drážky

	$n_n$	$\eta$	$M_0$
	[min <sup>-1</sup> ]	[%]	[Nm]
+2mm střední šířka $b_{s1}$	2629	61,6	1,36
+1mm střední šířka $b_{s1}$	2639	65,9	1,38
původní drážka	2636	68,3	1,41
-1mm střední šířka $b_{s1}$	2621	68,9	1,44
-2mm střední šířka $b_{s1}$	2595	68,5	1,47

Dále byl vyzkoušen vliv změny hloubky drážky  $h_{s2}$  na parametry stroje. Výsledky jsou obdobné jako u předchozích simulací. Prohloubením drážky dojde k výraznému nárůstu sycení jha rotoru, tím se zvýší magnetizační proud a narostou Jouleovy ztráty. Zvětšením plochy drážky se sice snižuje odpor klece a dojde k posunu pracovní části charakteristiky do vyšších otáček, ale zmenší se záběrný moment a klesne účinnost kvůli nárůstu ztrát.

Naopak při zmenšení hloubky klesne sycení jha, dojde ke snížení magnetizačního proudu a tím klesnou i ztráty ve vinutí statoru. Vzroste odpor klece, čímž se zvýší záběrný moment a jmenovité otáčky budou nižší.

Jelikož jsou ztráty v železe oproti Jouleovým ztrátám statoru a rotoru malé, bude výsledná účinnost záviset převážně na tom, jak se změní Jouleovy ztráty při úpravě geometrie drážky. Stroj je navržen na vysoké sycení, proto jakékoliv další přesycování má za následek prudký nárůst magnetizačního proudu a tím i ztrát ve statoru. Ztráty v kleci naopak klesají pozvolna při snižování skluzu. Proto není vhodné zvětšovat průřez drážky. Naopak zmenšení průřezu odsytí některé části rotoru, dojde k výraznému poklesu magnetizačního proudu a i při zvýšení skluzové frekvence a ztrát v kleci může dosahovat účinnost vyšších hodnot.

**Tabulka 11: Změna parametrů stroje v závislosti na hloubce drážky**

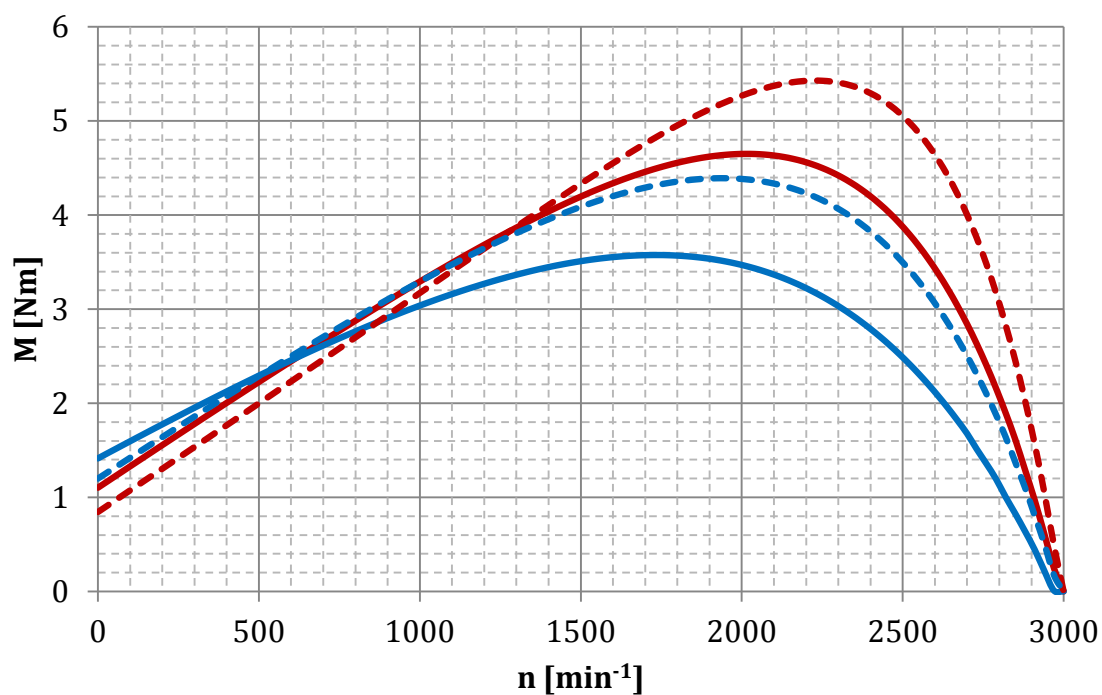
	$n_n$	$\eta$	$M_0$
	[min <sup>-1</sup> ]	[%]	[Nm]
+2mm hloubka drážky $h_{s2}$	2646	65,3	1,36
+1mm hloubka drážky $h_{s2}$	2644	67,5	1,39
původní drážka	2636	68,3	1,41
-1mm hloubka drážky $h_{s2}$	2623	68,9	1,44
-2mm hloubka drážky $h_{s2}$	2603	69,1	1,47

Standardně vyráběný motor má axiální šířku kruhu 4 mm kvůli zvýšení rotorového odporu a tím i záběrného momentu. Jelikož má však firma vyrábějící tyto motory k dispozici i formu pro lití kruhů s šířkou 10 mm, bude motor s tímto rozměrem také nasimulován. Materiál klece v simulacích je použit jak čistý hliník, tak slitina AlSi12Mn. Následně je provedeno porovnání parametrů stroje pro šířky kruhů 4 mm/10 mm a pro oba materiály klece. Z tabulky a grafů níže jsou vidět výsledky dle očekávání. Snížení odporu klece ať už zvětšením kruhů nebo použitím čistého hliníku má za následek snížení záběrného momentu (až o 40 %) a změnu sklonu charakteristiky v pracovní oblasti – jmenovitý pracovní bod se posouvá do vyšších otáček. Účinnost výrazně roste a pro čistý hliník s šířkou kruhů 10 mm je mnohem vyšší než u původního stroje. Roste také moment zvratu, což je dáno změnou celkové rozptylové indukčnosti klece. Při různých šířkách kruhu se mění rozptylová indukčnost a, dle vysvětlení v kapitole 3, dojde ke změně tvaru momentové charakteristiky i při konstantním napájení (sycení). Lze tedy upravovat parametry motoru, aniž bychom měnili geometrii drážky. Pokud by byla pro optimalizaci brána v úvahu pouze pracovní část charakteristiky, daly by se parametry motoru výrazně zlepšit z hlediska účinnosti, skluzového kmitočtu i maximálního momentu. Nevýhodou však je, že zlepšení parametrů ve jmenovitém

bodě má obvykle za následek zhoršení parametrů při záběru. A pokud bude kladen důraz na dodržení původní velikosti záběrného momentu, úpravě geometrie drážky se nevyhneme.

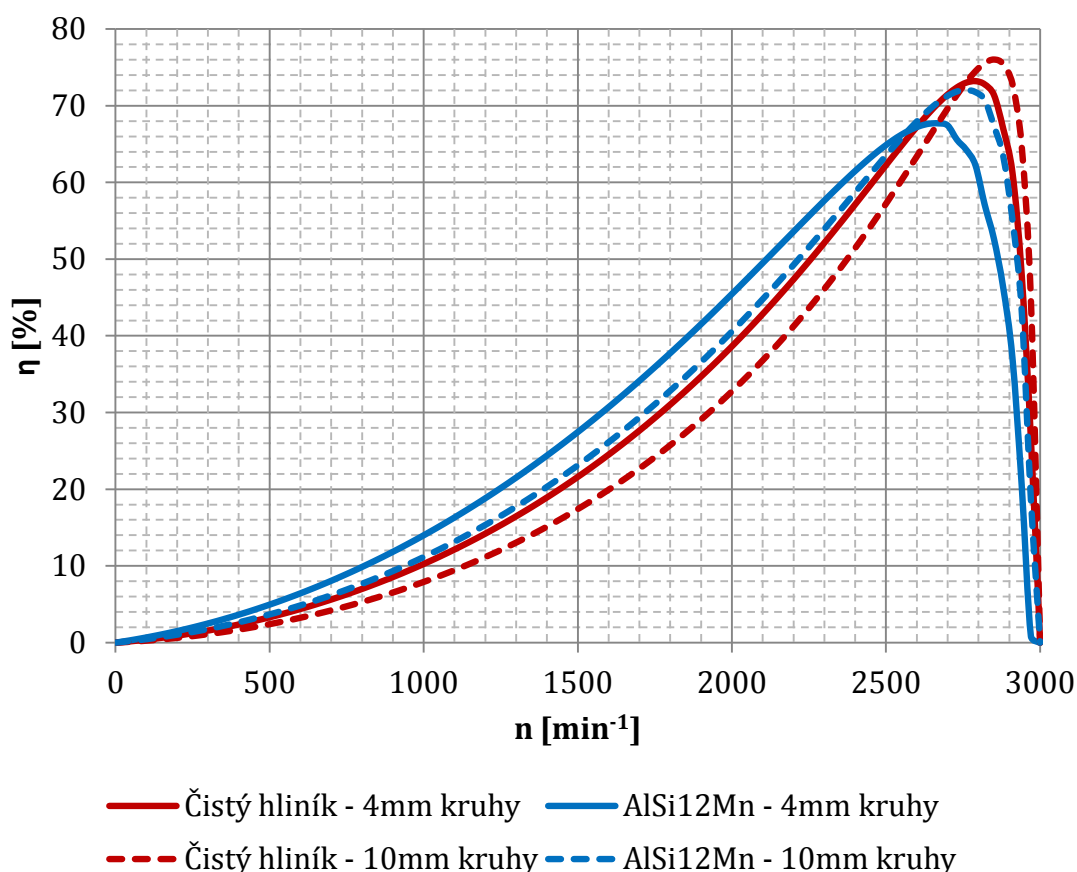
**Tabulka 12: Porovnání momentových charakteristik - šířka kruhu 4mm/10mm**

	$n_n$	$\eta$	$M_0$
	[min <sup>-1</sup> ]	[%]	[Nm]
AlSi12Mn - 4mm kruhy	2636	68,3	1,41
AlSi12Mn - 10mm kruhy	2777	72,7	1,20
Čistý hliník - 4mm kruhy	2811	73,6	1,10
Čistý hliník - 10mm kruhy	2884	75,9	0,84



— Čistý hliník - 4mm kruhy    — AlSi12Mn - 4mm kruhy  
 - - Čistý hliník - 10mm kruhy    - - AlSi12Mn - 10mm kruhy

**Obrázek 21: Porovnání momentových charakteristik pro různé šířky kruhu**



**Obrázek 22: Porovnání závislostí účinnosti na otáčkách pro různé šířky kruhu**

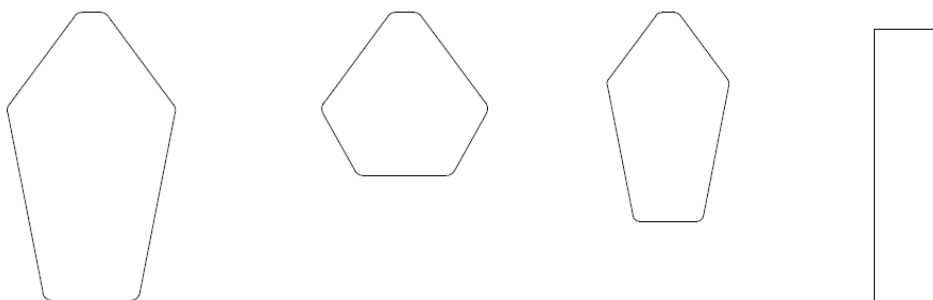
Nyní již víme, jak se chovají parametry stroje při změně rozměrů drážek a velikosti kruhů. Je tedy možné navrhnout a vyzkoušet různé tvary drážky, které by mohly splňovat původní parametry. Bude zaveden předpoklad, že momentová charakteristika závisí převážně na odporu klece. Z tohoto tedy vyplývá, že při změně materiálu klece je potřeba upravit novou drážku tak, aby poměr průřezů nové a staré drážky odpovídal poměru vodivostí materiálů.[30]

$$R_{vodič} = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (5.5)$$

$$\rho_1 \cdot \frac{l}{S_1} = \rho_2 \cdot \frac{l}{S_2} \quad (5.6)$$

$$S_2 = S_1 \cdot \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (5.7)$$

Jelikož je uvažována stejná délka jedné tyče klece, teplotní součinitel elektrického odporu je stejný pro slitinu AlSi12Mn i pro čistý hliník a oteplení klece rotoru je uvažováno stejné pro všechny simulace, lze vypočítat potřebný průřez nové drážky.



**Obrázek 23: Různé tvary drážek - a) původní , b) zmenšená výška  $h_{s2}$  , c) poměrově zmenšená d) obdélníková 1:4**

První varianta „b“ byla navržena jako zmenšení výšky původní drážky  $h_{s2}$  při zachování ostatních rozměrů. Velikost  $h_{s2}$  klesla o 4 mm z původní hodnoty. Druhá varianta drážky „c“ je zmenšení všech jejích rozměrů stejným činitelem pro dosažení požadovaného průřezu. Třetí drážka „d“ je obdélníkového tvaru s poměrem stran 1:4. Výsledky simulací pro všechny varianty lze vidět v Tabulka 13, grafické závislosti pak na Obrázek 24 a Obrázek 25.

**Tabulka 13: Simulace různých tvarů drážek**

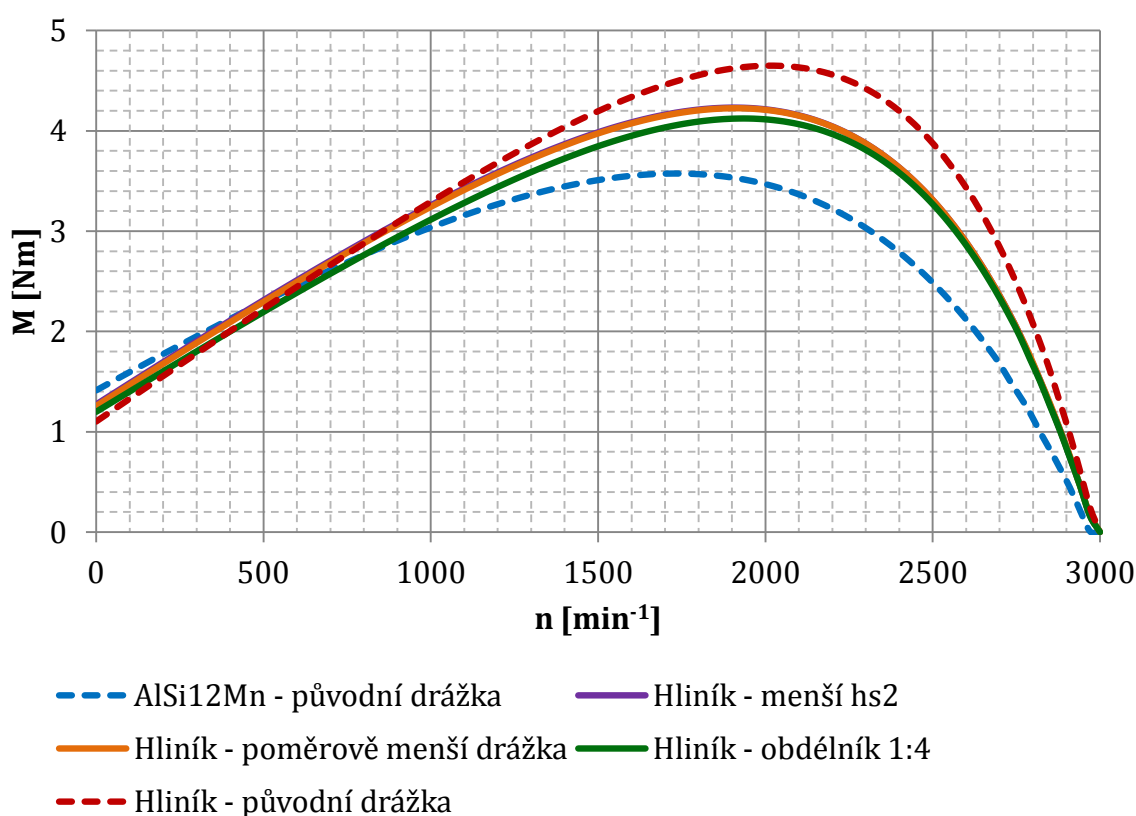
	$n_n$	$\eta$	$M_0$
	[ $\text{min}^{-1}$ ]	[%]	[Nm]
AlSi12Mn - původní drážka	2636	68,3	1,41
Menší výška $h_{s2}$	2758	74,9	1,27
Poměrově zmenšená	2759	74,6	1,26
Obdélníková 1:4	2755	73,8	1,2
Čistý hliník - původní drážka	2811	73,6	1,1

Ve všech případech byla změna parametrů obdobná. Jelikož je na materiál klece použit čistý hliník, došlo k poklesu odporu, čímž se změnil sklon momentové charakteristiky. Novým tvarem drážek bylo dosaženo stejného odporu tyčí jako v původním stroji. Rozměry kruhů zůstaly stejné, avšak jejich odpor se snížil, čímž došlo i ke snížení celkového odporu klece, který se nyní pohybuje mezi hodnotami původní klece a klece z čistého hliníku s původní drážkou.

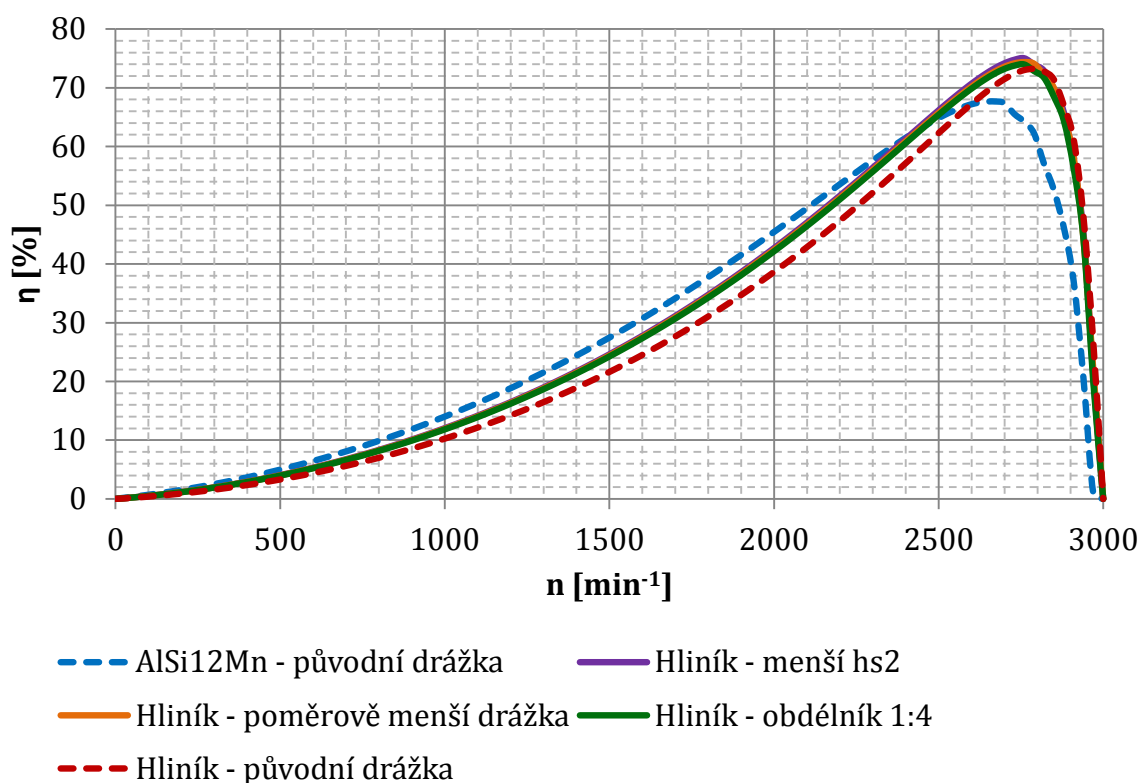
Účinnost stroje s novými drážkami je ve všech případech vyšší, jelikož při změně průřezu drážky došlo i ke zmenšení sycení jha a zubů rotoru a tím došlo ke snížení celkových ztrát. Také díky menšímu odporu klece došlo ke snížení Jouleových ztrát v rotoru.

Výrazně se zlepšily parametry v pracovní oblasti. Jak již však bylo dříve zmíněno, zlepšení v pracovní oblasti má za následek zhoršení parametrů v záběrné oblasti, což lze vidět z Tabulka 13. Účinnost výrazně vzrostla avšak za cenu snížení záběrného momentu, což je z hlediska cílů této práce nežádoucí. Je tedy několik

způsobů, jak požadovaného záběrného momentu dosáhnout. Buďto nadále zmenšovat průřez drážky, čímž se zvýší celkový odpor klece i při stejných rozměrech zkratovacích kruhů. Odpor materiálu klece je však závislý na teplotě a aktuálně je do simulačního programu zadáno oteplení klece ve všech místech stejné. Což by samozřejmě reálně nebyla pravda, jelikož úzké tyče v drážkách mají větší odpor oproti kruhům a docházelo by k jejich zahřívání o něco více. Při simulacích by toto muselo být bráno v úvahu a pro tyče i kruhy zadáván odpor (teplota) materiálu zvlášť. Teoreticky by mohlo dojít i k překročení dovolené teploty tyčí a k poškození plechů rotoru. To je však nepravděpodobné, jelikož takto vysoké teploty se ve stroji běžně nevyskytují kvůli možnému poškození izolace vinutí. Druhá možnost je změna rozměrů kruhů, kdy zmenšením průřezu kruhu lze dosáhnout požadovaného odporu klece. Je tedy potřeba nalézt kompromis, případně navrhnout takovou hodnotu záběrného momentu, která by vyhovovala jak z hlediska požadavků zákazníka, tak i z hlediska technologického.



Obrázek 24: Momentové charakteristiky pro různé tvary drážek

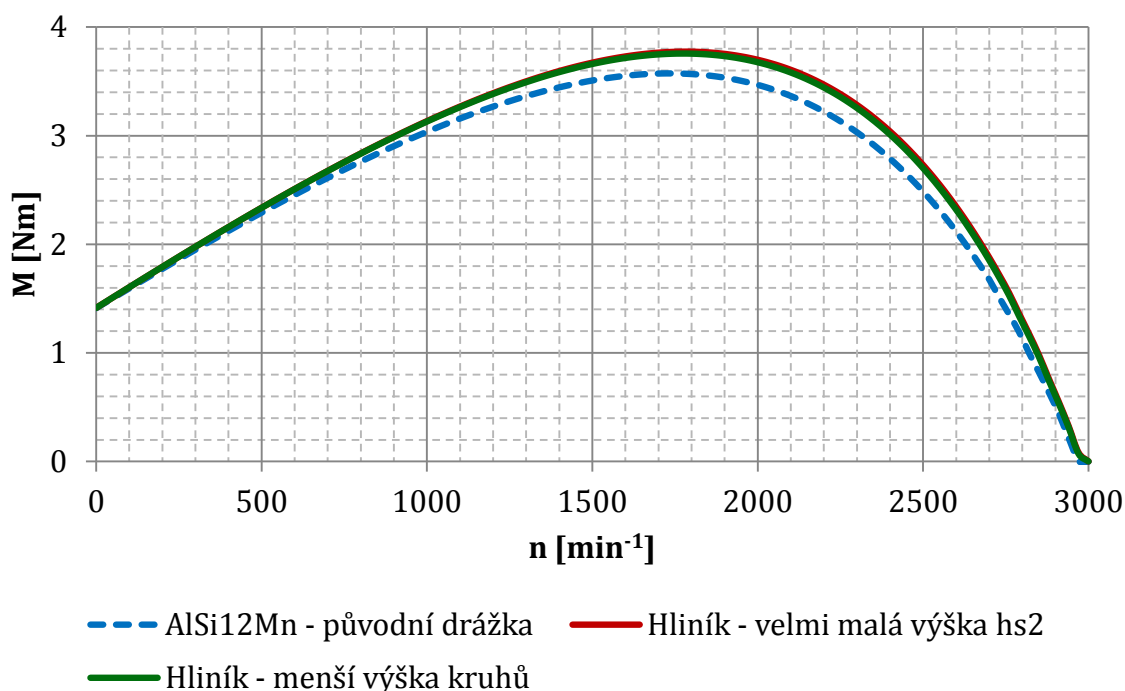


Obrázek 25: Závislost účinnosti na otáčkách pro různé tvary drážek

Z těchto výsledků byla poté provedena simulace nové drážky, u které má výsledný záběrný moment stejnou hodnotu jako u původního stroje. Toho bylo dosaženo tak, že v prvním případě zůstaly původní rozměry kruhů a výška drážky  $h_{s2}$  byla natolik snížena (téměř na nulu, ostatní rozměry zůstaly nezměněny), aby odpor klece dokázal vyvinout požadovaný moment. V druhém případě byla naopak použita drážka „b“ z Obrázek 23 z předchozích simulací (s průřezem odpovídajícím stejnému odporu tyčí) a změnou výšky kruhů byl dosažen stejný záběrný moment – výška kruhů snížena o 35 %.

Celkové ztráty ve jmenovitém bodě jsou nižší o 50 W než u prvotní simulace měřeného stroje – účinnost je tedy vyšší. Hlavní snížení ztrát je ve vinutí. Jelikož není stroj tolik přesycen, klesnul magnetizační proud a tím i ztráty ve statoru. Zvýšily se jmenovité otáčky, tím se snížil skluzový kmitočet a Jouleovy ztráty v kleci. Toto je podobné u obou variant a díky tomuto lze předpokládat, že oteplení rotoru nebude vyšší než u měřeného stroje. Pokud tedy nedojde k lokálnímu přehřívání, měl by nový návrh drážky tepelně vyhovět.





**Obrázek 26: Návrh drážky - snížení výšky  $h_{s2}$  a výšky kruhů**

Jedná se pouze o předběžný návrh drážky pro ověření, že změnou materiálu klece a tvaru drážky (případně tvarem kruhů) **lze dosáhnout parametrů původního stroje**. Je však nutno vzít v úvahu, zda se z ekonomického hlediska vyplatí změnit stávající geometrii a materiál stroje.

V další kapitole bude provedena optimalizace drážky pomocí genetického algoritmu. Hlavní kritéria budou dodržení záběrného momentu a zvýšení účinnosti ve jmenovitém bodě. Po dokončení optimalizace bude zhodnoceno, zda-li nová drážka přinese dostatečné zlepšení parametrů stroje. Pokud tomu tak nebude, lze případně přistoupit i k dalším úpravám, které by mohly přinést zlepšení parametrů stroje – změna počtu drážek, otevření rotorové drážky, změna počtu závitů statorového vinutí (změna sycení).

## 6 OPTIMALIZACE ROTOROVÉ DRÁŽKY

### 6.1 Provázání programů MATLAB a RMaxprt

Optimalizace drážky bude probíhat na základě genetického algoritmu napsaného v programu MATLAB. Jedná se o program pro řešení vědeckých a technických úkolů, tvorbu algoritmů, zpracování signálů a další. Jeho jazyk je založen na maticích, což přináší zjednodušení pro výpočet složitých matematických problémů. Je v něm možné vykreslovat grafy, využívat implementované nadstavby (tzv. „toolboxy“) a vytvářet skripty nebo funkce. [26]

Nejprve je však nutné simulační program RMaxprt propojit s MATLABem, aby mohl genetický algoritmus provádět změny parametrů drážek, ovládat simulování a získávat výsledné hodnoty pro vyhodnocování. Program Maxwell umožňuje zaznamenávání změn při práci v modelu do skriptového souboru v jazyce Visual Basic a zpětným spuštěním skriptu provede jednotlivé úkony dle záznamu. Pomocí [27] bylo pak nutné přepsat tento skript do jazyku MATLAB a níže můžeme vidět skript pro provázání a prvotní spuštění RMaxprt:

```
iMaxwell=actxserver('AnsoftMaxwell.MaxwellScript');
Desktop=iMaxwell.GetAppDesktop();
Desktop.RestoreWindow;
Desktop.OpenProject (join([Cesta_souboru, Nazev_projektu, '.aedt']));
Project = Desktop.SetActiveProject(Nazev_projektu);
Design = Project.SetActiveDesign(Nazev_designu);
invoke(Design, 'ChangeProperty', {'NAME:AllTabs',
    {'NAME:LocalVariableTab', {'NAME:PropServers',
    'LocalVariables'}, {'NAME:ChangedProps', {join(['NAME:x',
    num2str(5)]), 'Value:=' , [num2str(10), 'mm']}}}});
Design.Analyze(Nazev_analzy);
```

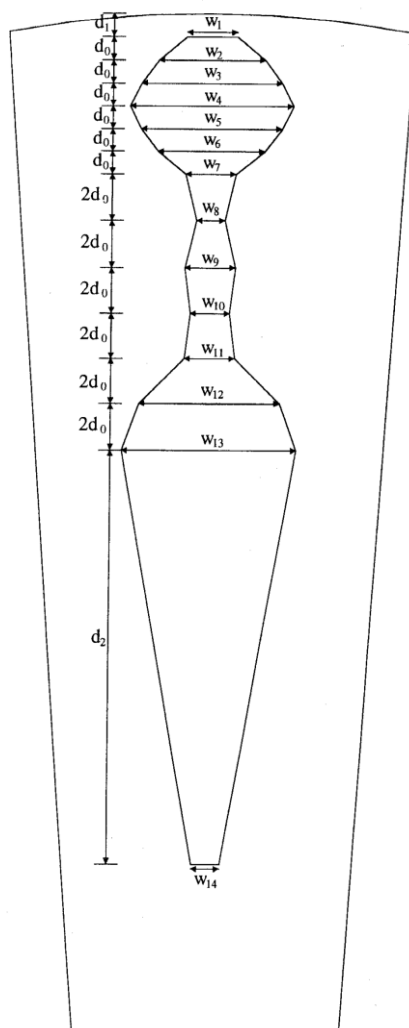
Nejprve dojde kotevření předem vytvořeného projektu a vybraného designu. Poté je pro ukázkou provedena změna velikosti proměnné  $x_5$  na 10 mm a následně je spuštěna analýza.

### 6.2 Úprava modelu pro snadnou optimalizaci

Jelikož bude prováděna optimalizace pro obecnou drážku bez předem definovaného tvaru, je potřeba parametrizovat všechny rozměry drážky. Možností jak tohoto docílit je mnoho.

Lze například celkový prostor možných rozměrů drážky (vymezený výškou můstku uzavření drážky, minimální šířkou zubů a minimální výškou jha rotoru) rozdělit na  $X$  segmentů s danou výškou a pro každý segment pak měnit šířku drážky v dovoleném rozmezí. Výhoda tohoto přístupu spočívá v tom, že při dostatečně jemné segmentaci výšky drážky je optimalizace obecná a relativně

přesná. Nevýhodou však je velký počet proměnných a tím i velmi dlouhý čas optimalizace.



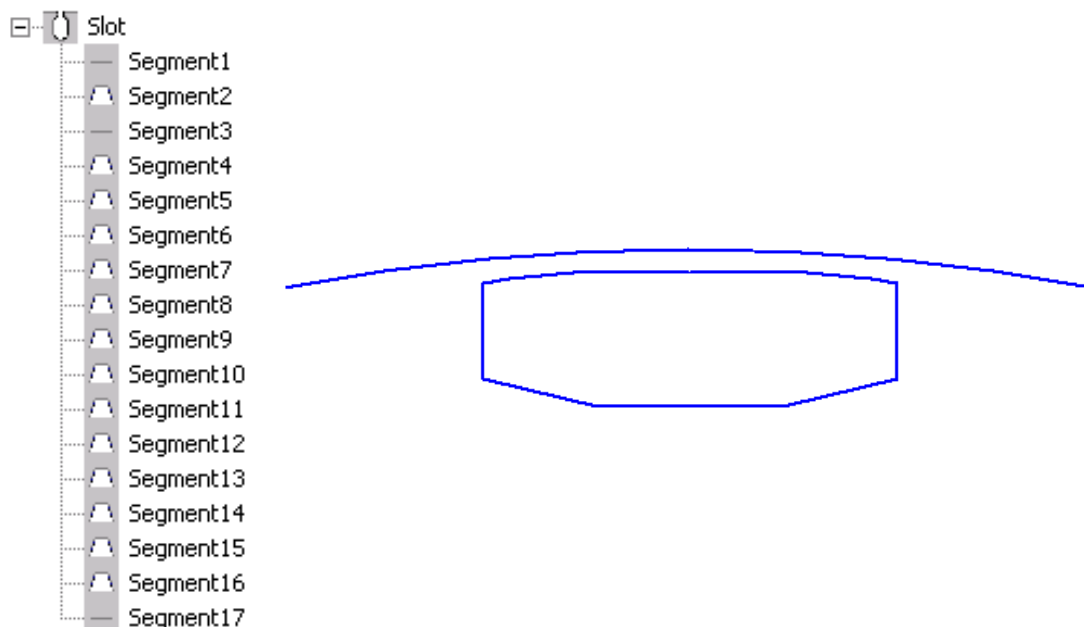
**Obrázek 27: Parametrizování optimalizované drážky (převzato z [24])**

Vhodný kompromis mezi délkou výpočetního času a přesností výpočtu nabízí parametrizovaná drážka dle [24] (Obrázek 27). Má dostatek segmentů na to, aby tvar drážky odpovídal reálné drážce, a zároveň neobsahuje velké množství proměnných, kvůli kterým by byl čas optimalizace zbytečně dlouhý. Drážka je rozdělena na 14 segmentů, kdy první segment  $d_1$  charakterizuje výšku můstku uzavření drážky. Následujících 6 segmentů má výšku  $d_0$ . Dalších 6 segmentů je také závislé na parametru  $d_0$  avšak jejich výška je  $2 \cdot d_0$ . Poslední segment má nezávislou výšku  $d_2$ . Velikost  $d_0$  je dána jako dvanáctina hloubky vniku skinefektu při zastaveném rotoru. Celkem je tedy nutno optimalizovat 16 parametrů – 2 výšky ( $d_1, d_2$ ) a 14 šířek drážky.[24]

Jelikož je simulovaný motor poměrně malý, nehraje velikost skinefektu výraznou roli, a proto bude provedena optimalizace parametru  $d_0$  jako proměnné. Pokud bychom totiž chtěli vzít velikost  $d_0$  rovnu  $1/12$  hloubky vniku, byla by hloubka drážky více než 17 mm, což je vzhledem k celkovým rozměrům rotoru příliš velká hodnota.

Bude také zjišťován vliv velikosti můstku  $d_1$  na parametry stroje. Pokud nebude mít jeho výška výrazný vliv, bude při návrhu nové drážky uvažována hodnota původního stroje.

Na následujícím Obrázek 28 je možno vidět, jednotlivé segmenty optimalizované drážky. V tomto případě byla výška můstku fixně nastavena na hodnotu odpovídající původní drážce. Ostatní rozměry drážky byly parametrizovány a díky genetickému algoritmu podrobeny optimalizaci. Hlavním kritériem optimalizace bylo dodržení záběrného momentu, což je splněno. Sekundární cíl bylo získat stejnou nebo vyšší hodnotu momentu ve jmenovitém bodě. A po splnění těchto podmínek optimalizovat drážku pro co nejvyšší jmenovitou účinnost. Optimalizovaná drážka měla chaotický tvar, jelikož nebyla zadána žádná podmínka plynulosti přechodu mezi jednotlivými výškovými segmenty drážky. Finální tvar byl proto ručně upraven, aby nevznikaly v drážce žádné ostré hrany nebo místa, která by představovala problém pro technologii výroby.



**Obrázek 28: Segmentace drážky v programu RMxpert a prvotní optimalizace**

Došlo ke zlepšení momentové charakteristiky. Záběrný moment je stejný, ale jmenovitý bod se posunul do vyšších otáček  $2667 \text{ min}^{-1}$  (původně  $2632 \text{ min}^{-1}$ ) a vzrostl i moment zvratu o 3,5 %. Výsledná účinnost ve jmenovitém bodě vyšla dle

simulací 73 %, což je vůči původní hodnotě relativní nárůst o téměř 7 %. Sycení jha rotoru pokleslo o 1 T a díky tomu došlo ke snížení magnetizačního proudu a ztrát ve vinutí statoru o 24 W. Ostatní části stroje zůstaly syceny přibližně stejně. Ztráty v železe zůstaly stejné jako u původní drážky a Jouleovy ztráty v rotoru poklesly o 24 W.

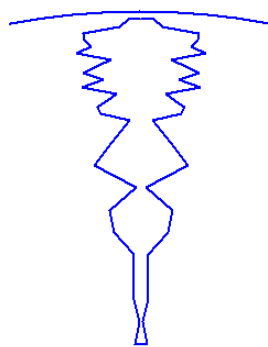
Tento návrh byl pouze orientační pro ověření funkčnosti genetického algoritmu a zjištění, kam bude optimalizace směřovat. Algoritmus se snaží udělat drážku pokud možno co nejširší a s co nejmenší hloubkou. Díky tomu roste záběrný moment. Navíc není rotor přesycován a klesá magnetizační proud. Skript genetického algoritmu bude potřeba mírně pozměnit z hlediska vyhodnocování parametrů a také zadat podmínky pro navržení plynulé geometrie drážky. Jelikož byla drážka vždy tlačena k povrchu s použitím proměnné výšky drážky dle Obrázek 27, bude otestováno, jak se chová optimalizační algoritmus při pevně daných výškách segmentů drážky.

## 6.3 Optimalizace drážky

Nyní bude genetický algoritmus nastaven na optimalizaci obecné drážky s pevně danou výškovou segmentací. Kritéria pro vyhodnocování byly opět záběrný moment a účinnost ve jmenovitém bodě (otáčky odpovídající 1,982 Nm na momentové křivce). Výška segmentů v horní části drážky byla nastavena na 0,3 mm, jelikož tvar drážky má v této oblasti velký vliv na záběrný moment. Krok spodní části je pak 1 mm pro snížení počtu proměnných a tím i zkrácení času optimalizace. Celkový počet segmentů drážky je 26, což je více než měla původně uvažovaná drážka na Obrázek 27. Maximální hloubka, do které se optimalizovaná drážka může dostat je 14,5 mm. Je však nutno říci, že při optimalizaci nebyla uvažována změna rozměrů zkratovacích kruhů. Toto zanáší do výsledků nepřesnost, jelikož výška kruhů je 9,25 mm, což by měl být také maximální rozměr hloubky drážky. Pro získání co největší škály možných tvarů drážky je však toto prozatím zanedbáno. U všech optimalizovaných drážek byla maximální šířka drážky omezena tak, aby šířka rotorového zubu byla minimálně 5 mm, což odpovídá hodnotě původního motoru.

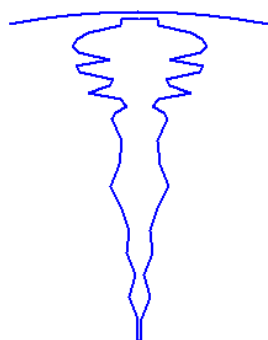
Několik prvních optimalizací bylo provedeno se snahou o zachování plochy původní drážky. Možná odchylka byla nastavena na  $\pm 10\%$  a z výsledků vyplynulo, že nelze dosáhnout původního záběrného momentu při zachování plochy. Na Obrázek 29 můžeme vidět tvar jedné z výsledných drážek. Jelikož nebyl algoritmus upraven pro uvažování pouze vyrobitelných tvarů, má hrana drážky nepravidelný zubatý tvar a spodní část je příliš úzká – hrozilo by při výrobě špatné zatékání hliníku. Záběrný moment u těchto tvarů drážek dosahoval maximálně hodnoty 1,1 Nm, což odpovídá poklesu o 22 % oproti momentu původní drážky. Účinnost

stroje s touto drážkou se ve jmenovitém bodě pohybuje okolo hodnoty 71 % (relativní nárůst o 4 %).



**Obrázek 29: Optimalizovaná drážka - stejná plocha drážky jako původní +-10%**

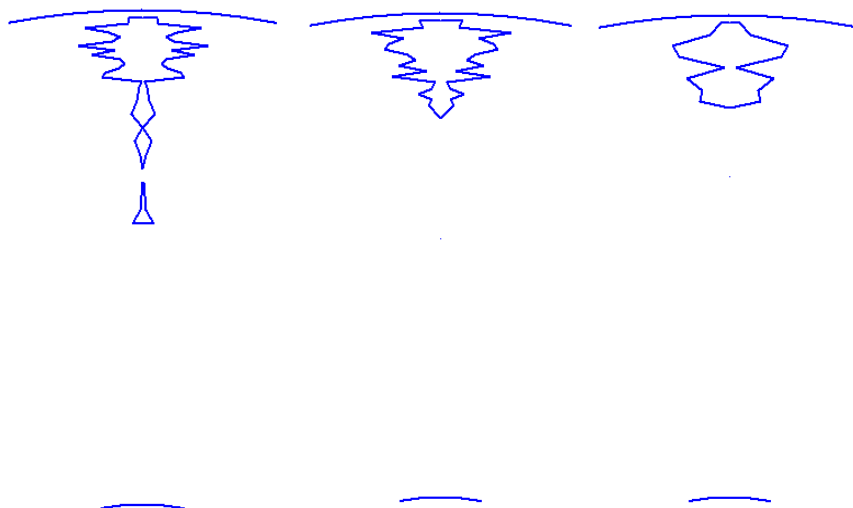
Byla provedena úprava v optimalizačním skriptu pro zjemnění přestupů mezi jednotlivými segmenty drážky a tím i vyhlazení jejího tvaru. Nebyl použit předpoklad hran drážek „Parallel Tooth“, který vytvoří zuby s konstantní šířkou, jelikož by došlo k zavedení zjednodušení, které by mohlo zahrnout některá možná řešení. Po provedení optimalizace vyšel tvar drážky podobný jako v předchozím případě. Záběrný moment i účinnost vyšly obdobně i přes zvětšení dovolené odchylky plochy na 20 %. Jmenovité otáčky vzrostly na 2793 rpm. Dochází k výraznému přesycování rotorového jha – dle RMXprtů až 4 T, a proto nebude vhodné v následujících optimalizacích zachovávat plochu drážky.



**Obrázek 30: Optimalizovaná drážka - stejná plocha drážky jako původní +-20%**

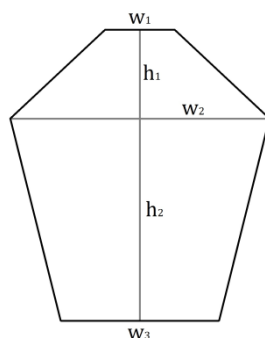
I přes vnucenou hodnotu minimální plochy drážky lze vidět, že je největší část klece tlačena co nejbližší vzduchové mezeře. To je dáno tím, že vyhodnocovací algoritmus upřednostňuje parametry v následujícím pořadí – Plocha drážky >> Záběrný moment >> Účinnost. Jakmile je dosaženo požadované hodnoty daného parametru, další zvyšování již nemá smysl a algoritmus přejde na optimalizaci dle následujícího parametru.

Desítky následujících optimalizací byly prováděny bez omezení velikosti plochy. Drážky mají chaotický tvar, jelikož nebylo použito žádné zjednodušení jejich geometrie v simulačním prostředí. Navíc analytický programu RMxpert pravděpodobně uvažuje při výpočtu zjednodušenou geometrii. Pokud by byla optimalizace prováděna pomocí metody konečných prvků, výsledné tvary by se mohly lišit, ale čas jedné simulace by byl 1000x delší. Nejprve byla uvažována původní výšková segmentace, ale z výsledků bylo zřejmé, že nejvhodnější umístění klece bude u povrchu rotoru. Proto byly v rámci časové úspory při optimalizacích odstraněny segmenty hlouběji v rotoru. Tím došlo ke snížení počtu proměnných a drážka již má přijatelnější tvar (viz Obrázek 31).



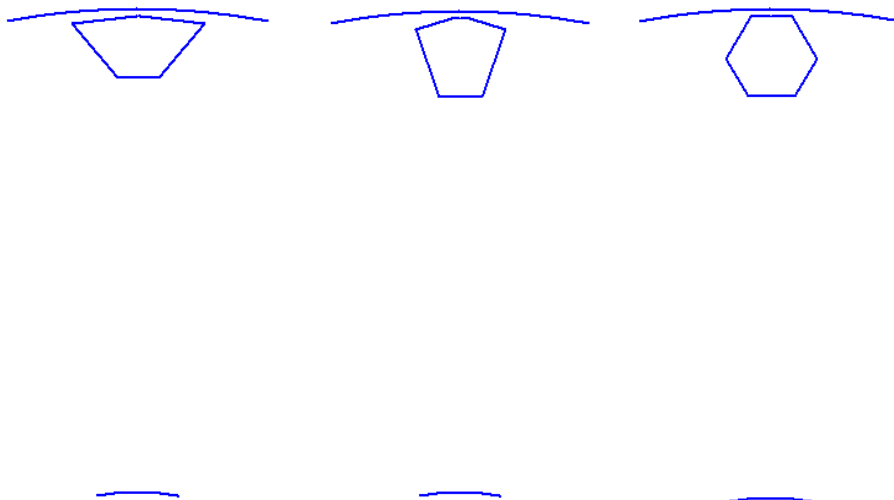
**Obrázek 31: Postupné zjednodušování optimalizované drážky - bez omezení plochy**

Výsledné parametry motoru vycházely ve všech případech téměř stejně a to tak, že byl splněn požadovaný záběrný moment 1,41 Nm a účinnost relativně vzrostla o 5 %. Drážky však měly i přes různé úpravy skriptu nepravidelný tvar. Proto byl v následujících simulacích uvažován nejjednodušší tvar drážky, který by umožňoval rozsáhlou optimalizaci - dva výškové segmenty s parametrizovanými šířkami i výškami. Zároveň je také drážka schopna vytvořit přibližně stejné tvary jako jsou výsledky předchozích optimalizací.



**Obrázek 32: Obecný zjednodušený tvar optimalizované drážky**

Nové tvary drážek vyšly dle předpokladů. Opět měly co nejmenší výšku a jsou situovány co nejbližší vzduchové mezeře. Výsledné parametry motoru byly ve všech případech shodné – při dodržení záběrného momentu došlo k relativnímu zvýšení účinnosti o 7,6 %. Tvary některých optimalizovaných drážek můžeme vidět na následujícím obrázku.



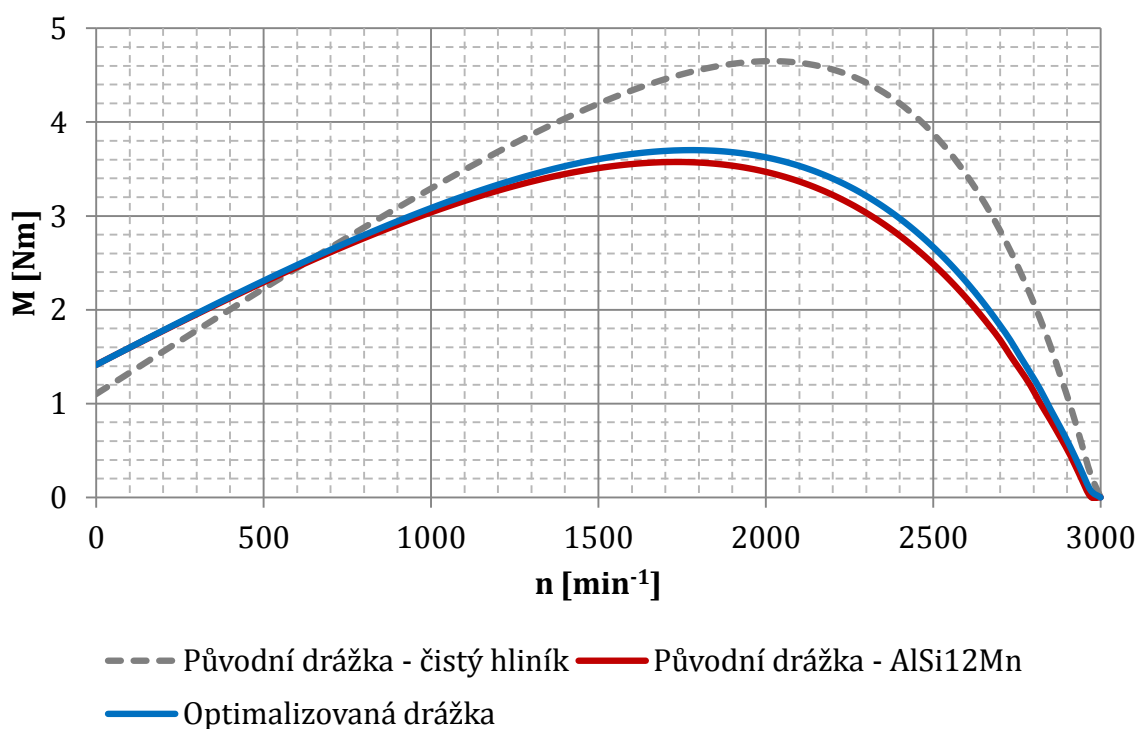
**Obrázek 33: Výsledky optimalizované drážky - zjednodušený tvar**

Všechny tyto drážky mají velikost plochy rovnu 30 % původní drážce. Při porovnání parametrů s původním strojem lze vidět, že se zvýšily jmenovité otáčky o 1,3 %, vzrostla účinnost o 7,6 % a došlo i ke zlepšení účinníku. To je způsobeno výrazným odsycením jha a zubů rotoru díky zmenšení rozměrů drážky, čímž narostla magnetizační indukčnost a došlo ke snížení magnetizační složky proudu. Díky tomu poklesl celkový proud a Jouleovy ztráty. Velikost záběrného proudu zůstala stejná jako u původní drážky.

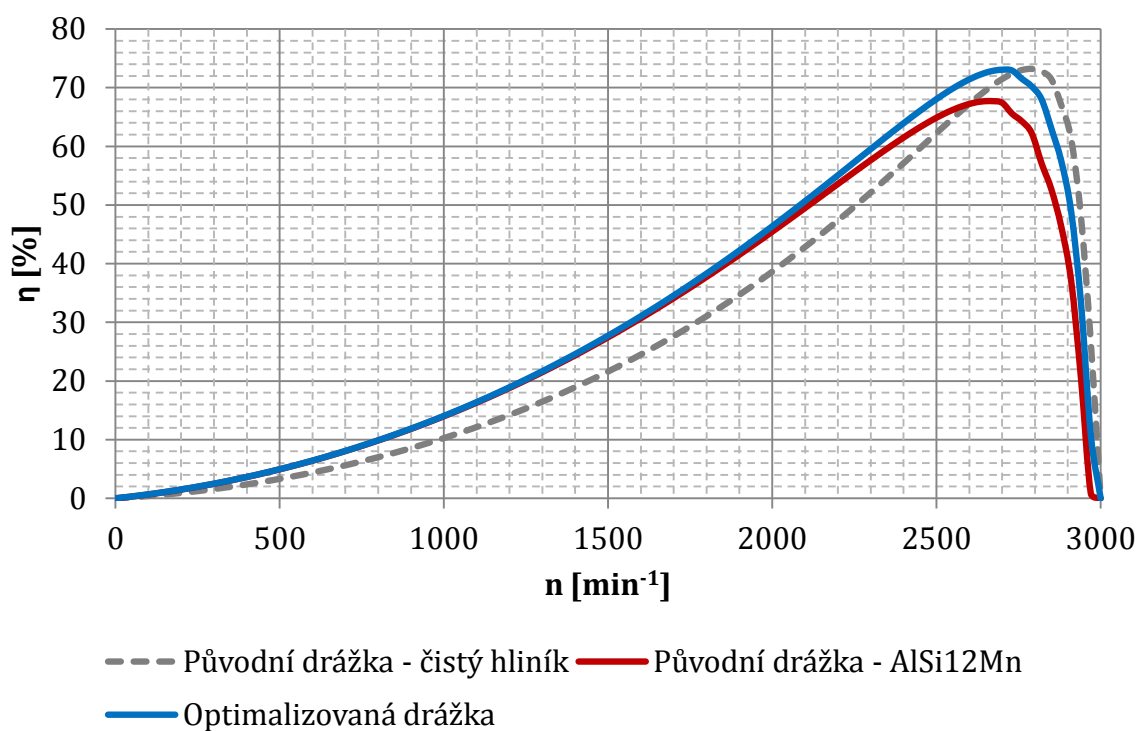


**Tabulka 14: Porovnání jmenovitých parametrů původní a optimalizované drážky - RMxpřt**

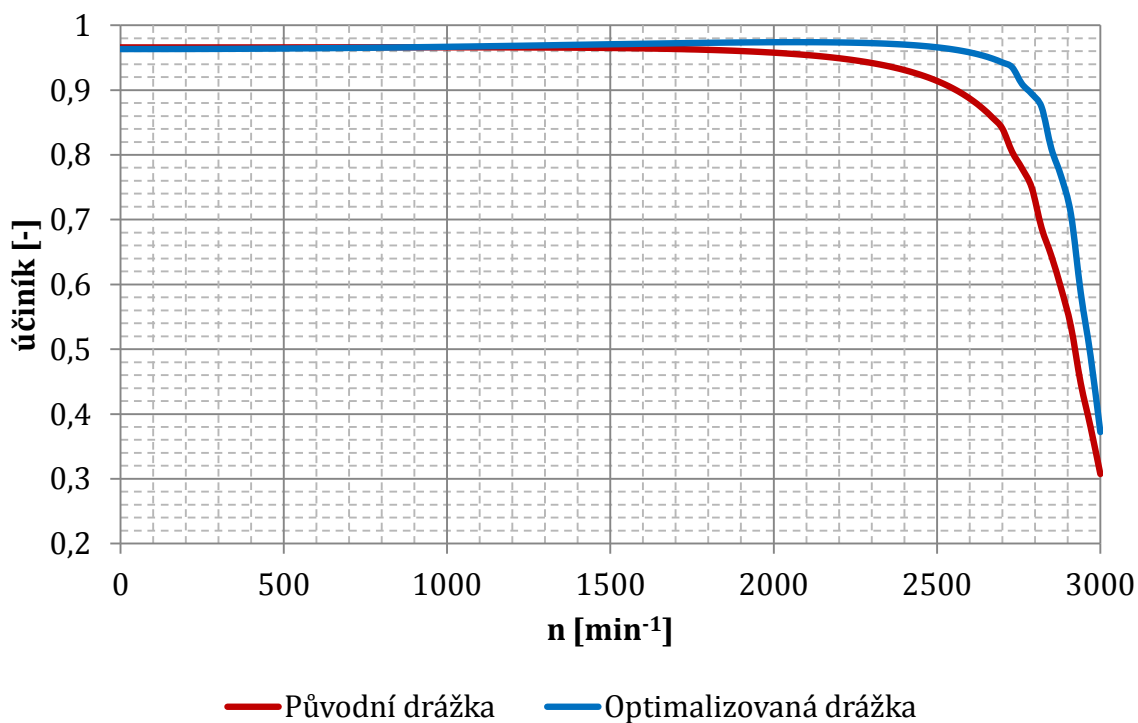
		Původní	Optimalizované
$n_n$	$[\text{min}^{-1}]$	2636	2670
$\eta$	$[\%]$	68,3	73,5
$\cos(\varphi)$	$[-]$	0,882	0,959
$I_1$	$[\text{A}]$	3,95	3,44
$I_{hl}$	$[\text{A}]$	3,79	2,89
$I_{pom}$	$[\text{A}]$	1,80	1,81



**Obrázek 34: Momentová charakteristika - porovnání původní a optimalizované drážky**



Obrázek 35: Charakteristika účinnosti – porovnání původní a optimalizované drážky

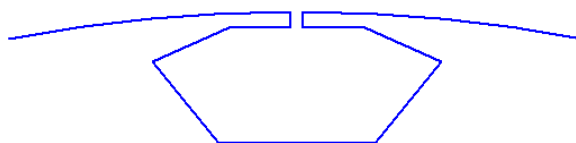


Obrázek 36: Charakteristika účíníku - porovnání původní a optimalizované drážky

Z charakteristik lze vidět, že maximální účinnost je stejná u nové i původní drážky pokud by byl použit čistý hliník. Momentová charakteristika nové drážky dosahuje mírně vyššího momentu zvratu než má motor s původní drážkou avšak je mnohem nižší, než kdyby byla původní drážka vyplněna čistým hliníkem - kvůli podmínce dodržení záběrného momentu. Ohyb charakteristiky účinku je posunut do vyšších otáček čímž došlo ve jmenovitém bodě k navýšení jeho hodnoty. Zhodnotíme-li tedy vhodnost použití optimalizované drážky ve stroji, zjistíme, že dojde k celkovému zlepšení parametrů. Záběrný moment dosahuje původní velikosti a hodnoty účinnosti i účinku vzrostly. Pokud nebude představovat tvar drážky mechanické, výrobní či jiné problémy, je výhodné použít nový tvar.

Charakteristiky by mohly být upraveny změnou počtu vodičů statorového vinutí, ale jelikož se tato práce zabývá pouze optimalizací tvaru rotorové drážky, nebudou takovéto změny uvažovány.

Pro prozkoumání dalších možností, byly provedeny optimalizace i pro otevřenou drážku. Proměnné rozměry jsou uvažovány obdobně dle zjednodušeného tvaru (Obrázek 32), avšak přibyla jedna proměnná navíc a tím je otevření drážky. Rozměr charakterizující otevření měl omezení pouze ve formě maximální hodnoty a nikoliv minimální. I přes to však optimalizační skript vytvořil výslednou drážku s téměř nulovým otevřením. Parametry motoru vyšly horší než u drážky bez otevření. Opět bylo dosaženo původní hodnoty záběrného momentu. Záběrný proud vyšel stejný, jako u optimalizovaných uzavřených drážek (viz Obrázek 33). Ve jmenovitém stavu jsou hodnoty otáček a účinku také obdobné, ale účinnost je nižší o 1 %, jelikož vzrostly ztráty v železe o 8 W. To je dáno vyšším sycením rotorových zubů, z důvodu snížení rozptylového toku přes můstek. Šířka optimalizované drážky je i přesto výrazně větší než její výška, jelikož sycení rotorového jha stále převyšuje sycení zubů.

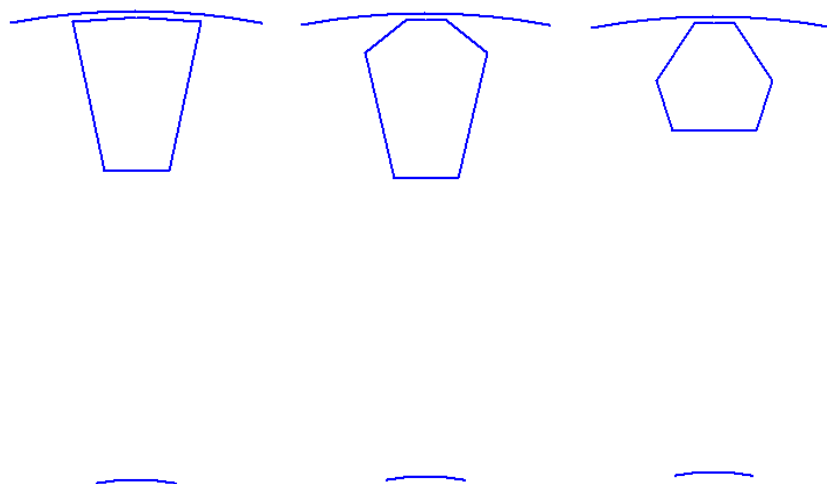


**Obrázek 37: Výsledek optimalizované otevřené drážky - zjednodušený tvar**

Pokud by optimalizační skript probíhal velmi dlouhou dobu, pravděpodobně by došel k výsledku bez otevření drážky. Ponecháme-li totiž rozměry drážky dle Obrázek 37 a drážku uzavřeme, dojde ke zlepšení parametrů a výsledky vyjdou obdobné jako pro uzavřené drážky (Tabulka 14).

U otevřené drážky je navíc nevýhoda vyšších dodatečných ztrát v hrdle, jelikož vznikají ztráty v zateklém hliníku. Pokud bychom chtěli hliník z můstku odstraňovat, znamenalo by to další výrobní náklady. Proto nebude otevřená drážka zvolena jako vhodná náhrada.

Byly provedeny také simulace pro zjištění maximální dosažitelné hodnoty účinnosti stroje, kdy optimalizační skript nebral v potaz záběrný moment. Nejprve byla nastavena tolerance plochy na  $\pm 10\%$  původní drážky. Výsledná drážka je opět umístěna co nejbližší povrchu. Jelikož však měla velkou plochu, bylo nutné nastavit minimální hodnotu výšky  $h_1$  pro zachování mechanické pevnosti můstku. V posledním kroku byly provedeny i simulace drážky bez výškových či plošných omezení.



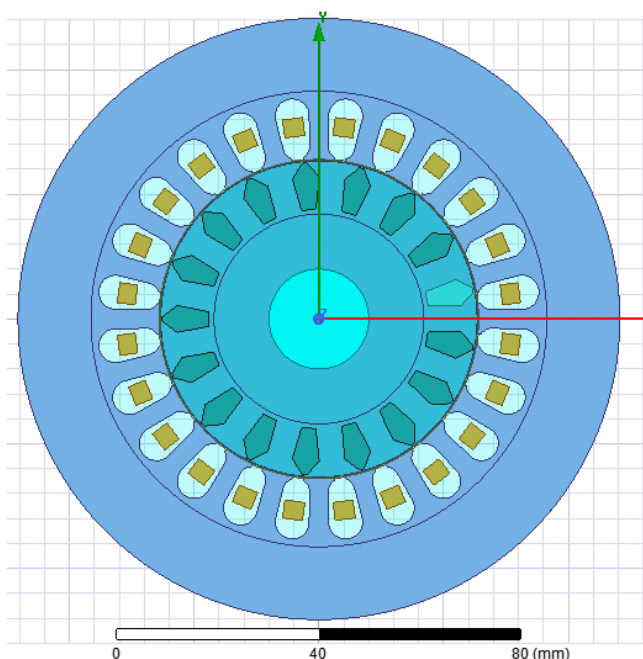
**Obrázek 38: Výsledky optimalizované drážky pro maximální účinnost a) Plocha  $\pm 10\%$ , b) Plocha  $\pm 10\%$  a  $h_{1min}=1,5$  mm, c) Bez omezení**

Parametry motoru vyšly dle předpokladů, kdy drážka a) a b) na Obrázek 38 dávají téměř stejné výsledky. První s plochou  $90,2\%$  má účinnost  $75,7\%$  a záběrný moment  $1,1$  Nm a druhá s plochou  $90,8\%$ , účinností  $75,6\%$  má záběrný moment  $1,1$  Nm. Největší ztráty jsou opět ve vodičích, kdy ve statorovém vinutí je  $85$  W a v kleci rotoru  $47$  W. Třetí drážka c) s plochou  $61,9\%$  původní drážky má účinnost  $76\%$  a záběrný moment  $1,2$  Nm. Díky menším rozměrům došlo k odsycení rotoru a snížení statorového proudu. Ve vinutí je nyní  $76$  W ztrát a v kleci  $51$  W. Z výsledků těchto optimalizací lze opět vyvodit, že není výhodné dodržovat plochu původní drážky. Zmenšením plochy vzroste jak záběrný moment, tak i účinnost – maximálně může dojít k navýšení účinnosti o relativních  $11,3\%$  oproti původní hodnotě.

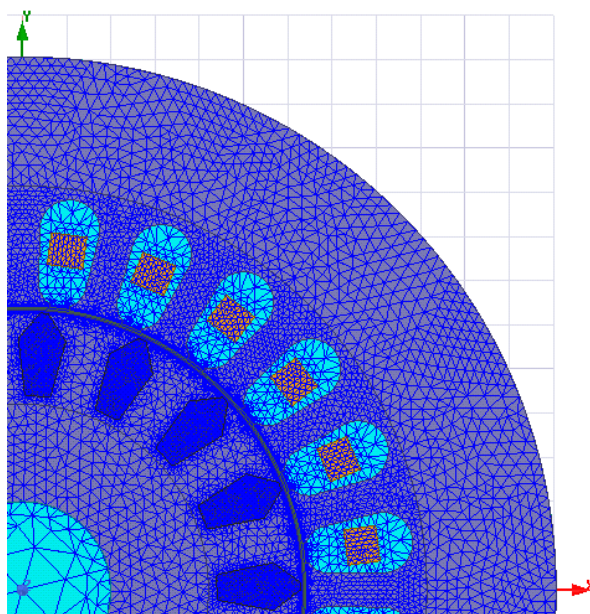
## 6.4 Ověření optimalizovaných drážek pomocí MKP

Jelikož byly drážky optimalizovány v analytickém programu RMxpert, je nutné ověřit správnost řešení pomocí metody konečných prvků. Pro každou drážku je potřeba provést dvě simulace. Jednu pro záběrný moment, kdy otáčky stroje jsou nastaveny na nulovou hodnotu a druhou, ve které je pomocí přechodné analýzy nastaven zatěžovací moment dle štítku stroje (1,982 Nm) a po ustálení jsou odečteny jmenovité parametry stroje.

Nejprve je potřeba získat referenční hodnoty původní drážky. Model byl vygenerován automaticky z prostředí RMxpert. Poté byly provedeny úpravy jemnosti sítě, napájecího obvodu, materiálových vlastností a dalších parametrů pro správnou analýzu. Přesnost výsledků metody konečných prvků závisí na hustotě a rozložení prvků sítě. Ve vzduchové mezeře, což je jedna z nejdůležitějších částí stroje, byla nastavena mnohem hustější síť než v ostatních částech stroje - minimální počet elementů byl zvolen 3 elementy nad sebou. Vzhledem k lichému počtu rotorových tyčí a dvoupólovému provedení stroje nebylo možné simulovat jen jeho část, čímž by byl čas simulace výrazně zkrácen. Satorové a rotorové plechy byly rozděleny na jho a zuby. Velikost síťování v zubech je zjemněna kvůli přesycování úžin, rozptylu, ztrátám v železe a dalším faktorům. Také tyče byly vymeshovány hustou sítí kvůli indukovaným vířivým proudům a případnému skinefektu. Na přesnost výpočtu má velmi velký vliv krok simulace. Musí být zvolen natolik malý, aby korespondoval s otáčkami stroje a vhodnou vzorkovací frekvencí. Na druhou stranu chceme velikost kroku co největší pro rychlé nasimulování modelu.



Obrázek 39: Model motoru pro simulaci pomocí FEM



**Obrázek 40: Síťování modelu pro simulaci pomocí FEM**

Ve všech simulacích (RMxpert i MKP) je uvažován nemagnetický materiál hřídele z důvodu přesnějších výsledků. Pokud by byla uvažována ocelová hřídel, parametry ve jmenovitém chodu se budou daleko více rozcházet s měřením - poklesne sycení rotoru, sníží se magnetizační proud, statorový proud hlavní větve poklesne na 3,1 A, což je o 0,6 A menší proud než naměřený. Celkový proud je pak 3,46 A (o 0,5 A nižší) a díky tomu také poklesnou ztráty ve vinutí na 75 W oproti naměřeným 91 W. Otáčky vzrostou na 2667 min<sup>-1</sup> a snížením skluzu poklesnou ztráty v kleci. Celkové ztráty by pak byly o 100 W nižší, účinnost 74 % by byla o 9 % vyšší a velikost účinníku by byla o 0,2 vyšší ve srovnání s naměřenými hodnotami.

Po provedení simulací původní drážky byla zjištěna hodnota záběrného momentu 1,3 Nm při napájecím proudu 10,3 A. Srovnání naměřených a nasimulovaných hodnot je v následující tabulce. Při porovnání jednotlivých veličin je zřejmé, že výsledné hodnoty z metody konečných prvků se více blíží naměřeným než simulace provedené pomocí RMxpertu.

**Tabulka 15: Záběrný moment - srovnání hodnot původní drážky**

		Měření	RMxpert	FEM
$M_0$	[Nm]	1,23	1,41	1,30
$I_1$	[A]	10,0	11,1	10,3
$I_{hl}$	[A]	10,4	11,3	10,7
$I_{pom}$	[A]	1,28	1,24	1,28
$\cos(\varphi)$	[-]	0,920	0,966	0,925
$\Delta P$	[W]	2126	2466	2202

Činné ztráty jsou v případě nulových otáček rovny činnému příkonu. Ten je získán jako střední hodnota průběhu zdánlivého příkonu. Hodnota zdánlivého příkonu je vypočítána z efektivní hodnoty napájecího napětí a proudu. Účinník stroje je poté vypočten jako podíl těchto příkonů.[1]

$$\cos(\varphi) = \frac{\Delta P}{U_1 \cdot I_1} = \frac{2202}{230,14 \cdot 10,34} = 0,925 \quad (6.1)$$

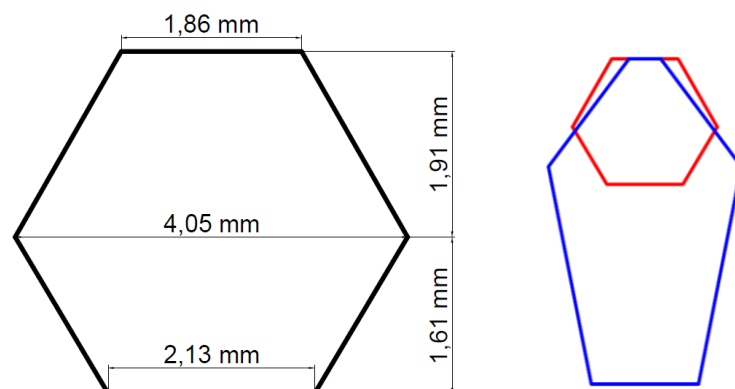
Na druhou stranu při jmenovitém chodu dle Tabulka 16 dává o něco přesnější výsledky RMxpřt. Účinnost vychází v simulaci MKP vyšší o 4,5 %. Při porovnání jednotlivých ztrát víme, že hlavní rozdíl je v kleci rotoru a v železe (Tabulka 9). Jelikož však nebylo provedeno měření náhradních parametrů motoru, nelze přesně určit zdroj ztrát. Účinník je v simulacích nižší o 0,04.

**Tabulka 16: Jmenovitý chod - srovnání hodnot původní drážky**

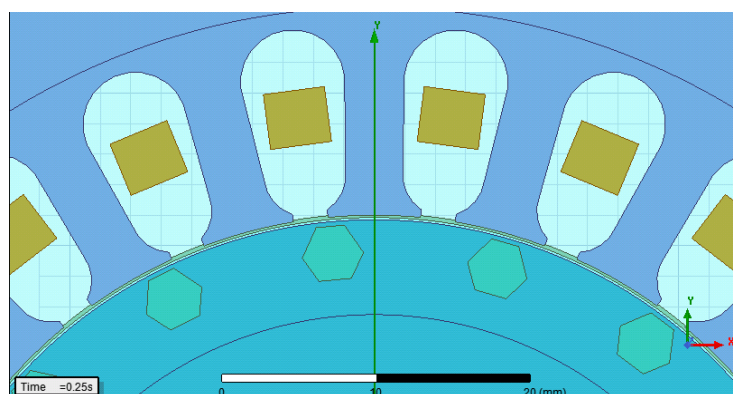
		Měření	RMxpřt	FEM
$n_n$	[min <sup>-1</sup> ]	2633	2636	2621
$\eta$	[%]	64,7	68,3	69,2
$\cos(\varphi)$	[-]	0,918	0,882	0,877
$I_1$	[A]	3,99	3,95	3,90
$I_{hl}$	[A]	3,69	3,79	3,80
$I_{pom}$	[A]	1,71	1,80	1,74
$\Delta P$	[W]	298	254	242

### 6.4.1 Optimalizovaná drážka č.1

Jako jeden z vhodnějších tvarů pro nahrazení rezistivní slitiny čistým hliníkem se jeví drážka připomínající hexagon. Jelikož je užší než původní drážka, zvětšila se šířka zubů v nejužším místě z 5,1 mm na 6,8 mm. Hloubka drážky je také výrazně menší. Díky tomu došlo k odsycení zubů i jha. Na obrázku níže lze vidět rozměry drážky a dále jsou v Tabulka 17a Tabulka 18 porovnány hodnoty simulací metody konečných prvků pro původní a optimalizovanou drážku.



Obrázek 41: Rozměry optimalizované drážky č.1 a porovnání s původní drážkou



Obrázek 42: Detail optimalizované drážky č.1

Tabulka 17: Porovnání výsledků drážky č.1 - Záběrný moment

		Původní	Drážka č.1		Původní
		FEM	FEM	RMxpřt	RMxpřt
$M_0$	[Nm]	1,30	1,32	1,41	1,41
$I_1$	[A]	10,3	10,8	11,2	11,1
$I_{hl}$	[A]	10,7	11,0	11,4	11,3
$I_{pom}$	[A]	1,28	1,26	1,25	1,24
$\cos(\varphi)$	[-]	0,925	0,941	0,963	0,966
$\Delta P$	[W]	2202	2329	2489	2466

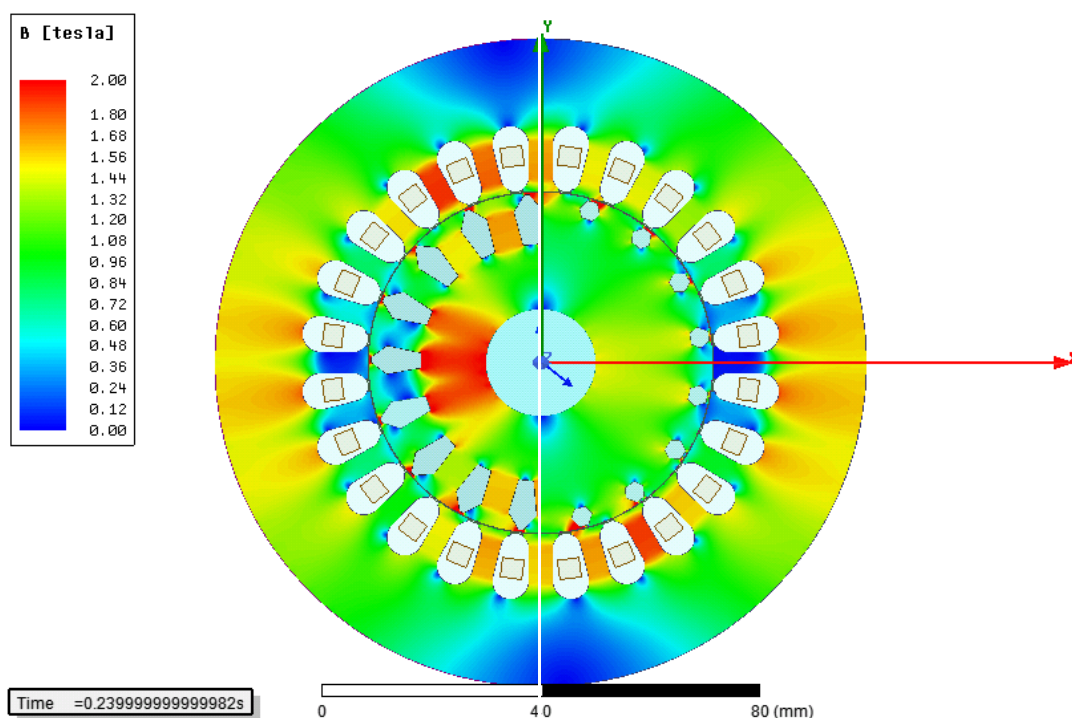
Při optimalizaci byla dodržena hodnota záběrného momentu a dle simulací metody konečných prvků navíc vzrostla o 1,5 %. Vzrostla také efektivní hodnota proudu téměř o 5 %, ale magnetizační složka poklesla, jelikož došlo ze zvýšení účinníku o 1,7 %. Je zřejmé, že metoda konečných prvků i analytický výpočet dávají téměř stejné výsledky záběrného momentu pro různé drážky. U jmenovitého chodu můžeme naopak vidět shodu výsledků různých metod výpočtu pro jeden typ drážky.



**Tabulka 18: Porovnání výsledků drážky č.1 - Jmenovitý chod**

		Původní	Drážka č.1		Původní
		FEM	FEM	RMxpřt	RMxpřt
$n_n$	[min <sup>-1</sup> ]	2621	2676	2670	2636
$\eta$	[%]	69,2	74,8	73,5	68,3
$\cos(\varphi)$	[-]	0,877	0,968	0,959	0,882
$I_1$	[A]	3,90	3,34	3,44	3,95
$I_{hl}$	[A]	3,80	2,84	2,89	3,79
$I_{pom}$	[A]	1,74	1,77	1,81	1,80
$\Delta P$	[W]	242	187	201	254

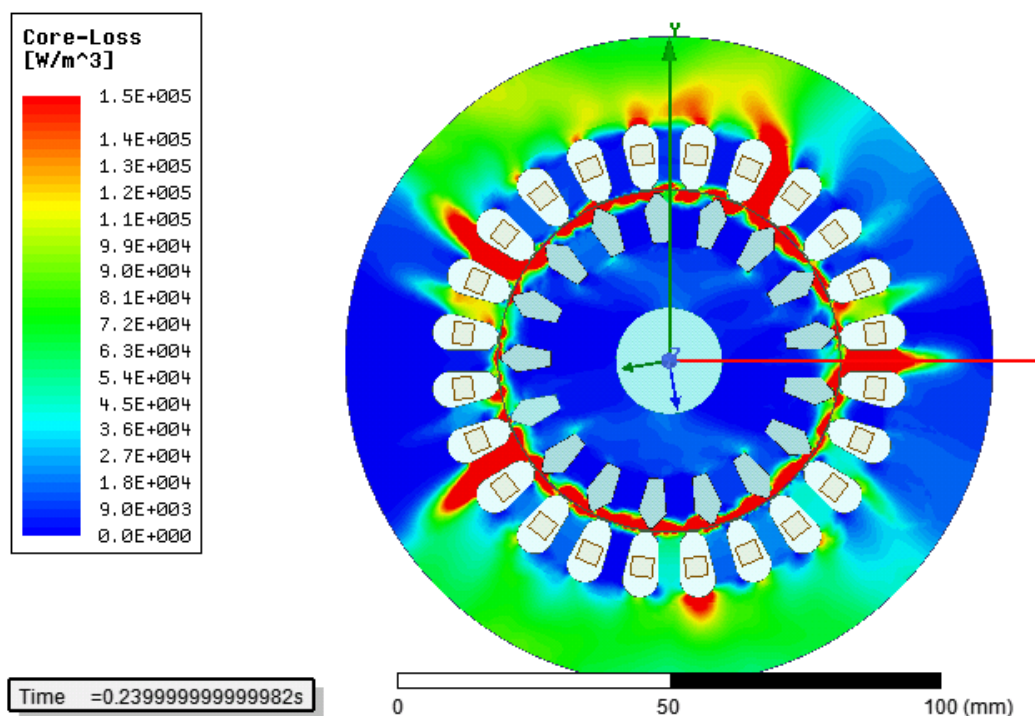
Jmenovité otáčky stroje s optimalizovanou drážkou vzrostly o 2 %. Díky poklesu celkových ztrát došlo k relativnímu zvýšení účinnosti o 8 %. Účinník vzrostl o 10 % díky poklesu magnetizačního proudu odsycením rotoru. Avšak v reálném stroji nebude zlepšení účinníku tak výrazné. Naměřená hodnota účinníku stroje 0,92 je vyšší, než referenční hodnota 0,877 simulovaná pomocí MKP. Na obrázcích níže je zobrazeno rozložení magnetické indukce v plechu statoru a rotoru pro původní i optimalizovanou drážku. Na první pohled lze vidět výrazný úbytek míst s lokálním přesycováním, převážně v rotoru. Celkové ztráty v železe zůstaly stejné, ale odsycení magnetického obvodu má za následek snížení magnetizačního proudu. Výrazně proto klesly Jouleovy ztráty statorového vinutí z původních 98 W na 69 W a poklesly také Jouleovy ztráty v kleci rotoru přibližně o 26 W.



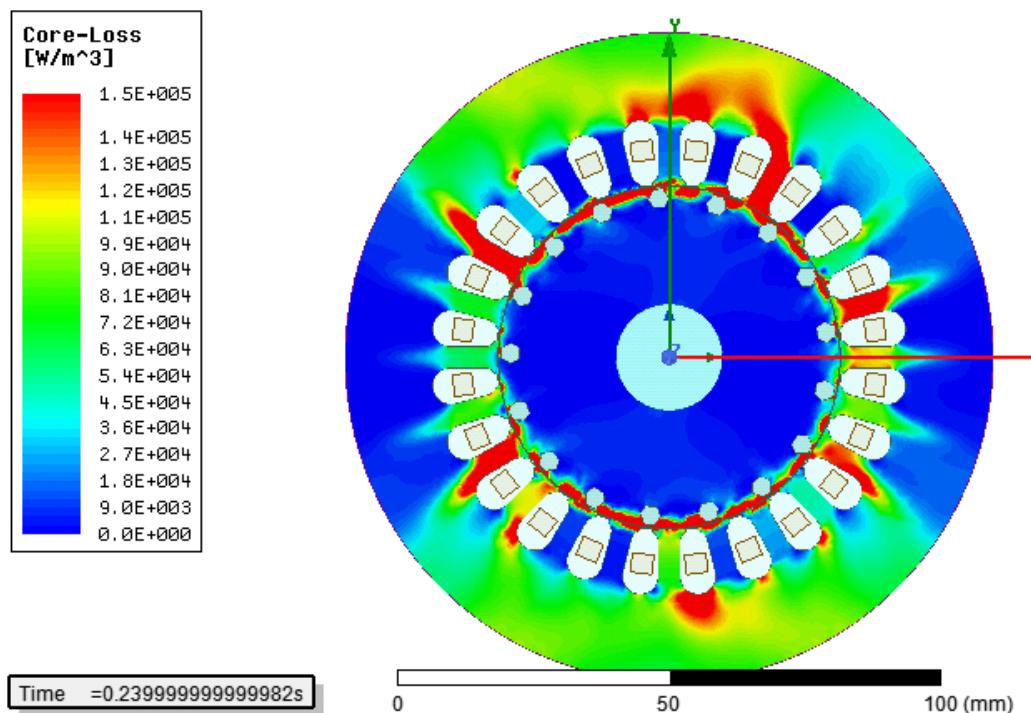
**Obrázek 43: Rozložení indukce v motoru s původní drážkou (vlevo) a s optimalizovanou drážkou č.1 (vpravo)**

Byly nalezeny maximální hodnoty indukce pro porovnání. U původní drážky se indukce běžně blížila hodnotě 2 T ve jhu rotoru, lokálně pak bylo nalezeno až 2,5 T na spodní hraně drážky. U optimalizované drážky indukce v rotoru dosahovala 1,5 T, u hrany drážky až 1,6 T, což je výrazný pokles oproti původnímu návrhu. Nejnasyčenější zub statoru měl v obou případech stejnou maximální hodnotu 1,9 T.

Na obrázcích níže můžeme také vidět rozložení ztrát v železe u původního stroje i u stroje s optimalizovanou drážkou. V obou případech je největší plošná hustota ztrát na povrchu rotoru a v zubech statoru. Pokud však provedeme integraci ztrát v objemu stroje, zjistíme, že ztráty v zubech rotoru představují přibližně jen 29 % celkových ztrát v železe. Ve jhu rotoru jsou pouze 2 % ztrát. Převážná část je pak generována ve statorovém jhu (48 %) a zubech (21 %). U obou typů drážek jsou simulované ztráty v železe přibližně 41 W.

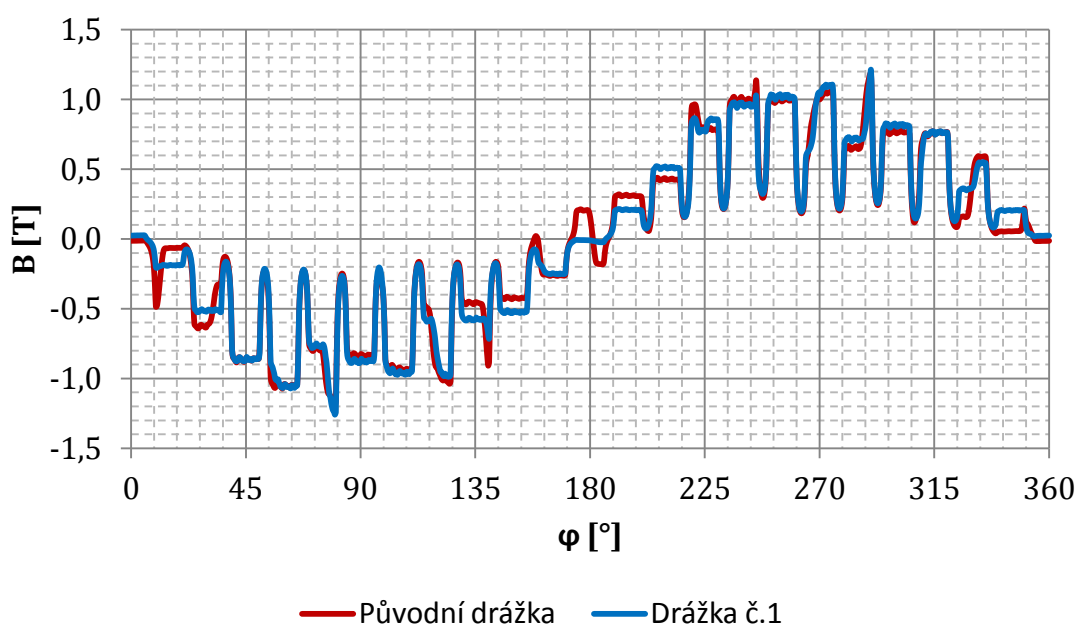


Obrázek 44: Rozložení ztrát v železe v motoru s původní drážkou



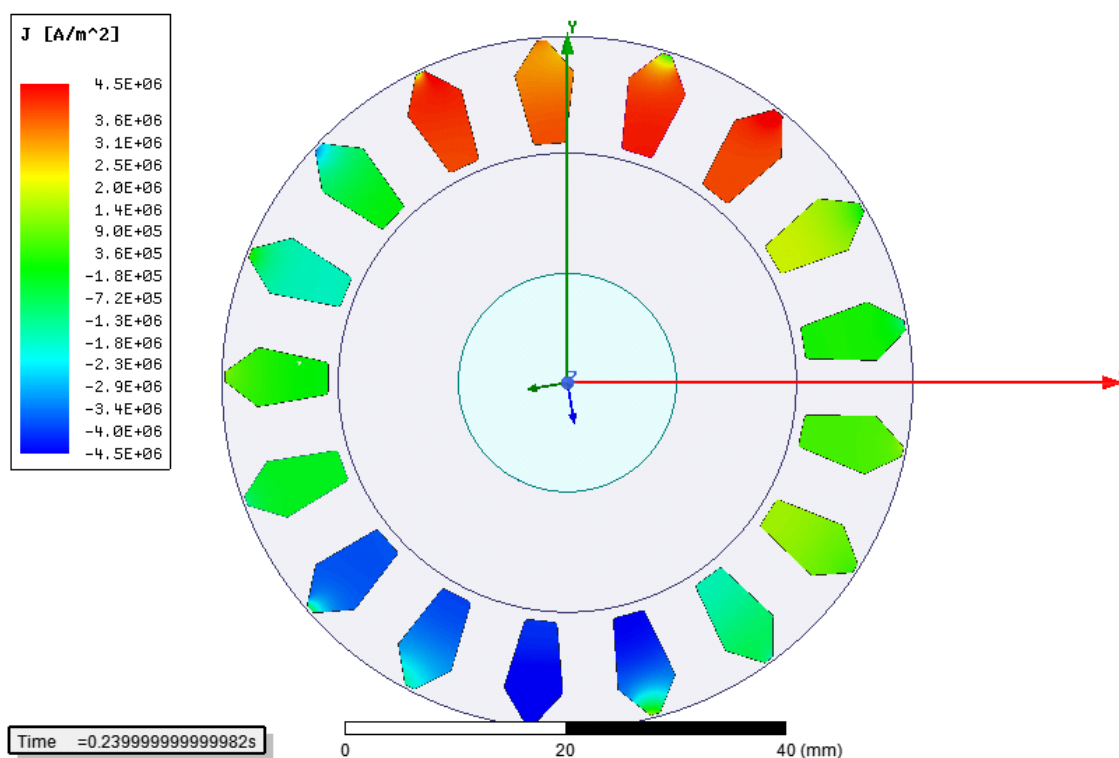
Obrázek 45: Rozložení ztrát v železe v motoru s optimalizovanou drážkou č.1

Následuje porovnání velikosti indukce ve vzduchové mezeře. Na první pohled je vidět, že průběh indukce se liší převážně v místech mezi póly. To je pravděpodobně způsobeno tím, že původní drážka má přesycené jho rotoru a proto se část toku uzavírá jako rozptyl ve vzduchové mezeře mezi póly. Optimalizovaná drážka má na druhou stranu méně nasycený rotor, díky tomu je rozptyl menší a průběh plynulejší.

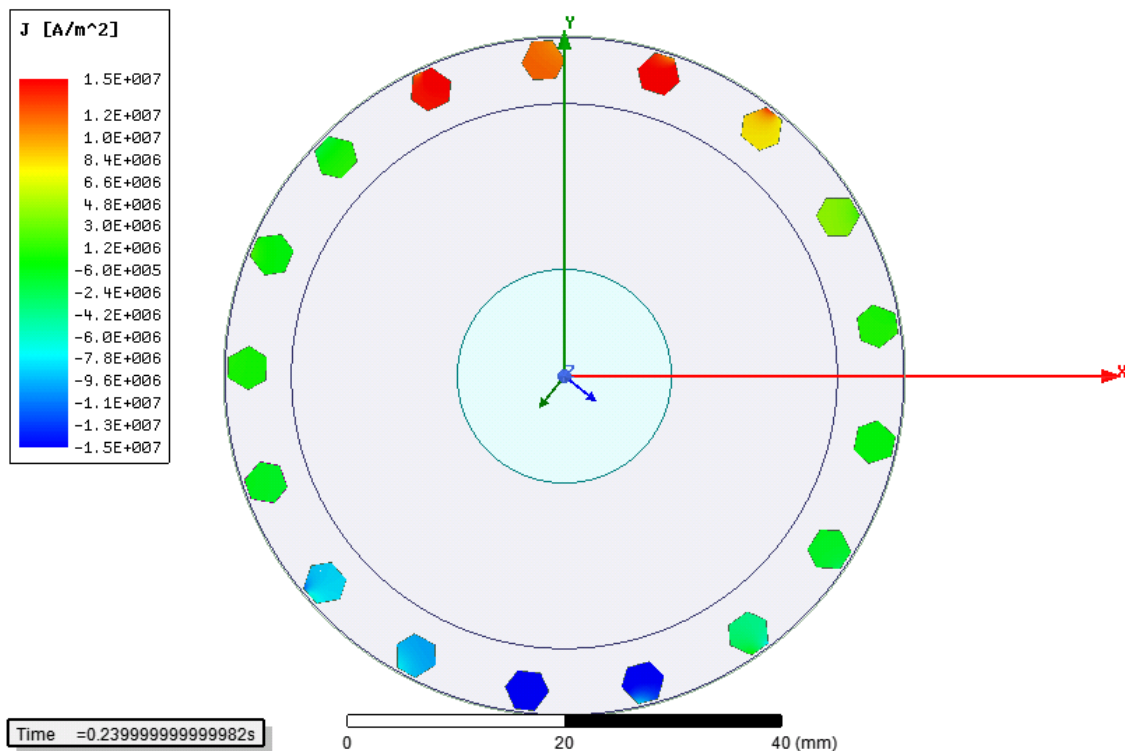


Při provedení frekvenční analýzy průběhů indukce bylo zjištěno, že optimalizovaná drážka má velikost první harmonické složky indukce rovnu 0,82 T. Původní drážka má indukci první harmonické nižší o 2 % a to 0,804 T, avšak velikost většiny ostatních harmonických složek má větší. Díky tomu bude mít nová drážka menší zvlnění momentu.

Velikost zkratovacích kruhů byla ponechána stejná jako u měřeného stroje. Proto byl optimalizační skript nucen zmenšit rotorovou drážku natolik, aby vyšla hodnota celkového odporu klece přibližně stejná jako u původní drážky a tím bylo dosaženo požadovaného záběrného momentu. Pokud by bylo možné ponížít rozměry kruhů, průřez drážky by se mohl zvětšit a optimální tvar by již mohl vypadat jinak. Optimalizovaná drážka tedy splnila požadované parametry a její tvar by měl být reálně výrobitelný.



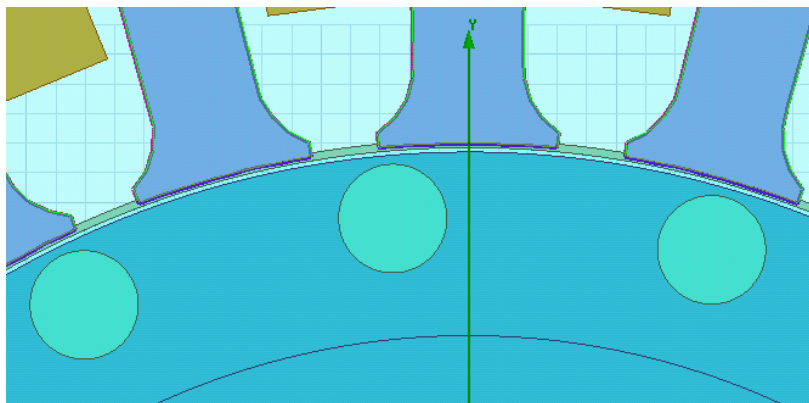
Obrázek 46: Rozložení proudové hustoty v tyčích motoru s původní drážkou



**Obrázek 47: Rozložení proudové hustoty v tyčích motoru s optimalizovanou drážkou č.1**

Na obrázcích výše je rozložení proudové hustoty původní a optimalizované drážky. Rozsah stupnice byl u optimalizované drážky nastaven 3,3krát větší než u původní kvůli předpokladu, že při stejném momentu a sycení protéká klecí stejný proud. Pokud by byla plocha optimalizované drážky 54 % původní, pak by tyče měly stejný odpor před i po změně materiálu klece. Jelikož je však plocha optimalizovaných jen 30 %, mají tyče vyšší odpor než u původní drážky. Změnil se tedy poměr odporu tyčí a kruhů, a proto bude generováno více Jouleových ztrát v drážkách.

Nyní bude provedena simulace drážky kulatého tvaru stejného průřezu a umístění jako u této optimalizované drážky pro zjištění vlivu zaoblení hran na parametry stroje. Šířka rotorového můstku v nejužším místě bude ponechána stejná 0,3 mm a poloměr kulaté drážky bude 1,836 mm. Při porovnání hodnot z RMxpertu vyšly všechny parametry totožně pro jmenovitý i záběrný stav. Jmenovité parametry simulované metodou konečných prvků vyšly také stejně jako u drážky č.1 (Tabulka 18), ale nastaly malé rozdíly u MKP při nulových otáčkách.



Obrázek 48: Detail kulatých drážek č.1

Tabulka 19: Porovnání výsledků drážky č.1 s kulatou - Záběrný moment

		Dr.č.1	Kulatá		Dr.č.1
		FEM	FEM	RMxpřt	RMxpřt
$M_0$	[Nm]	1,32	1,35	1,41	1,41
$I_1$	[A]	10,8	10,7	11,2	11,2
$I_{hl}$	[A]	11,0	11,0	11,4	11,4
$I_{pom}$	[A]	1,26	1,27	1,25	1,25
$\cos(\varphi)$	[-]	0,941	0,935	0,962	0,963
$\Delta P$	[W]	2329	2300	2480	2489

Původní drážka měla v simulaci hodnotu záběrného momentu 1,30 Nm. Šestiúhelníková drážka má moment 1,32 Nm což odpovídá nárůstu 1,5 %. Kulatá drážka se záběrným momentem 1,35 Nm představuje navýšení o 3,8 %. Pokud bychom tuto hodnotu aplikovali na reálnou hodnotu 1,23 Nm změřenou při zkoušce, získali bychom předpokládanou hodnotu momentu s novou drážkou.

$$M_0 = 1,23 \cdot \frac{(100 + 3,8)}{100} = 1,28 \text{ Nm} \quad (6.2)$$

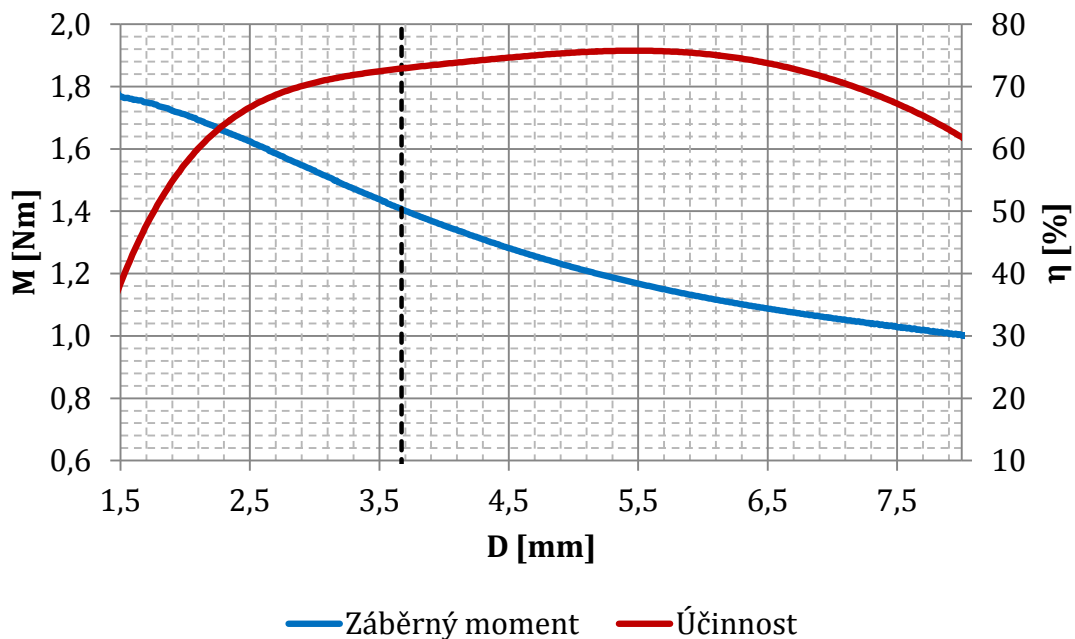
U kulaté drážky dojde k malému snížení účinníku a celkového proudu ve srovnání s drážkou č.1. V porovnání s původní drážkou stále splňuje požadované parametry, jelikož vzroste záběrný moment o 3,8 %, proud vzroste o 3,9 % a účinník o 1,7 %. Rozběh je však uvažován jako krátkodobý stav, při kterém je důležitý především moment kvůli maximálnímu možnému zatížení a proud z důvodu dimenzování ochran. Jmenovité parametry jsou pak výrazně lepší, především co se týče účinnosti, která vzroste o 5,6 %.

Zaoblení drážky č.1 tedy nemá na parametry stroje příliš velký vliv, pokud je dodržena stejná plocha a umístění drážky. Toto však nelze říct obecně, jelikož



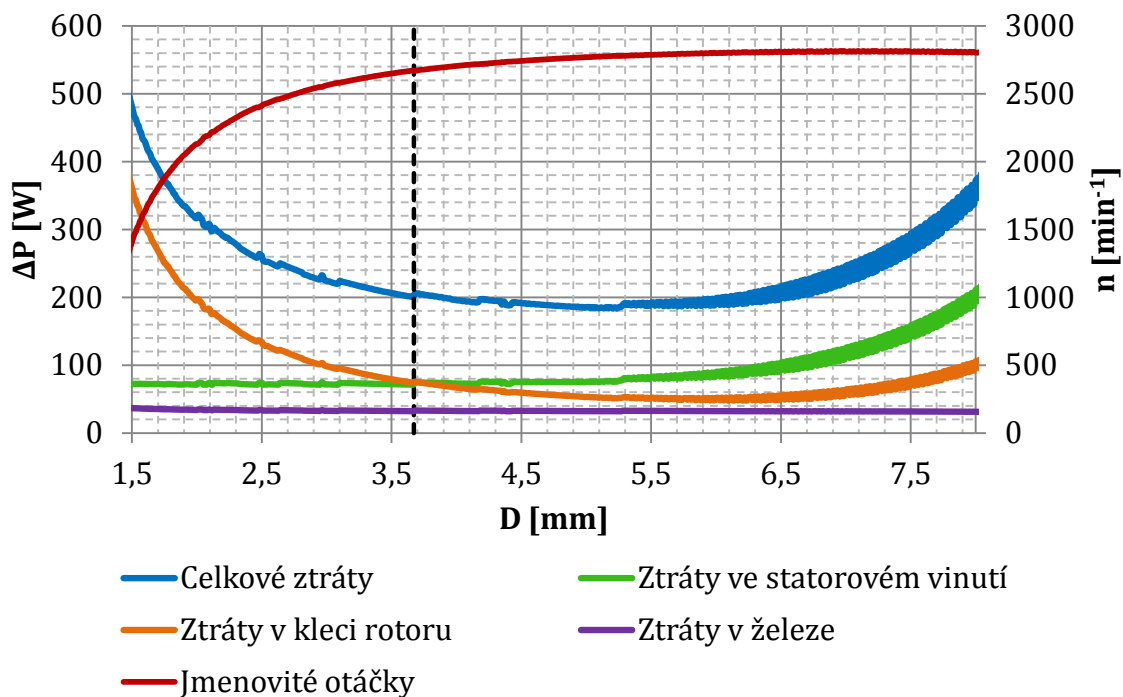
v závislosti na velikosti syčení magnetického obvodu v okolí drážky by i malá úprava geometrie mohla výrazně změnit parametry stroje.

Dále bylo zpětně provedeno ověření optimálního průměru kulaté drážky pomocí doplňku Optimetrics v prostředí RMxpert. Při zachování výšky uzavření rotorové drážky 0,3 mm byly prováděny simulace v nastaveném rozsahu průměrů drážky.



**Obrázek 49: Graf závislosti záběrného momentu a účinnosti na průměru kulaté drážky**

V grafu je vyznačen průměr optimalizované drážky ( $D = 3,67$  mm). Pro tento rozměr vychází záběrný moment 1,41 Nm a účinnost ve jmenovitém bodě 73,5 %. Výsledky se shodují se simulací hexagonální drážky v Tabulka 17 a Tabulka 18. Skript tedy našel optimální hodnotu plochy drážky, jelikož při zmenšování drážky klesá účinnost stroje a zbytečně narůstá záběrný moment. Na druhou stranu při větší ploše drážky by účinnost narůstala, ale vlivem zvyšování vodivosti klece by klesal záběrný moment pod požadovanou hodnotu 1,41 Nm. Tyto křivky platí však pouze pro kulatou drážku, a pokud bychom měnili její geometrii, nemusela by mít při stejné ploše tytéž parametry.



Obrázek 50: Graf závislosti ztrát a jmenovitých otáček na průměru kulaté drážky

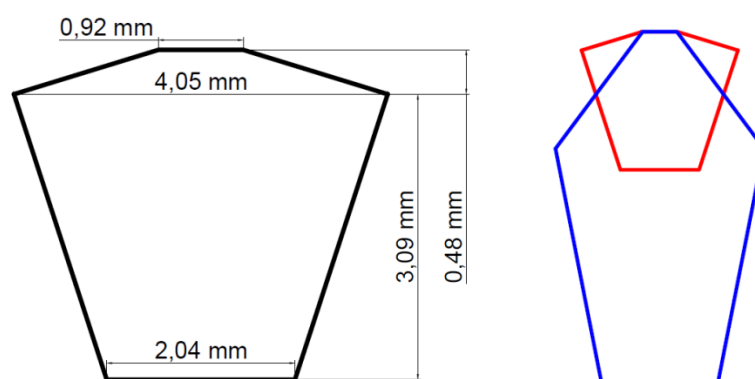
Při porovnání ztrát při jmenovitém chodu v závislosti na průměru kulaté drážky lze vidět, že ztráty v železe jsou na celém rozsahu téměř konstantní. Ztráty ve statorovém vinutí mají téměř konstantní hodnotu při malých rozměrech, avšak ve chvíli kdy průměr drážky začne nabývat velkých hodnot, mají zuby rotoru malou šířku, dochází k jejich přesycování, klesá magnetizační indukčnost a výrazně roste magnetizační proud. To se projeví výrazným zvýšením Jouleových ztrát ve vodičích. Ztráty v kleci jsou naopak při malých rozměrech drážky velmi vysoké vlivem velkého odporu klece a vyšší elektrické (skluzové) frekvence rotoru. Při zvětšování průměru drážky rostou otáčky, roste vodivost klece a ztráty klesají až do chvíle, kdy jsou zuby rotoru natolik úzké, že se magnetické siločáry začnou uzavírat skrz drážky. To má pravděpodobně za následek indukování vířivých proudů v kleci a následné generování Joulových ztrát. Navíc rostoucí statorový proud způsobuje větší napěťový úbytek na odporu vinutí, čímž klesá napětí na cívce a poklesne i sycení stroje. Pro dodržení stejného momentu tedy musí klecí protékat vyšší proud.

Při větších průměrech drážky vykazují výsledné hodnoty určitou nepřesnost, která se projevila v grafických závislostech. I přes to však lze jednoduše najít globální minimum u ztrát (184 W) a maximum u účinnosti (75,9 %). Oběma těmito extrémům odpovídá průměr drážky 5,2 mm a při tomto rozměru je hodnota záběrného momentu 1,2 Nm. Plocha této drážky s průměrem 5,2 mm a její výsledné parametry odpovídají již dříve optimalizované drážce pro dosažení maximální účinnosti (Obrázek 38).

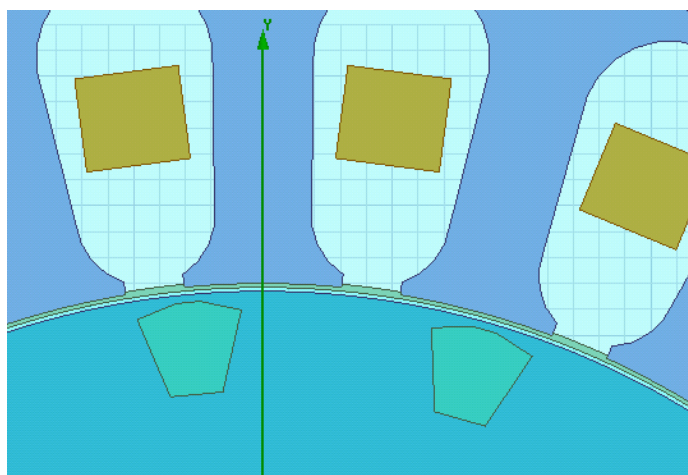


## 6.4.2 Optimalizovaná drážka č.2

Velikost plochy je opět rovna 30 % původní drážky a její největší šířka je stejná jako u drážky č.1. Tvar drážky v MKP byl vygenerován přesně podle optimalizovaného modelu v RMXprt aby nedošlo k ovlivnění výsledků. Nejprve bude tedy nasimulována drážka s ostrými hranami. V reálném stroji by však byly rohy drážky zaoblené, čímž by nepatrně poklesnul její obsah a vzrostl by záběrný moment. Proto je v druhém kroku provedena simulace se zaoblenými rohy.



Obrázek 51: Rozměry optimalizované drážky č.2 a porovnání s původní drážkou



Obrázek 52: Detail optimalizované drážky č.2

Při porovnání hodnot z RMXprt pro záběrný moment lze vidět, že se výsledky téměř shodují. U metody konečných prvků však dochází k rozdílům. Záběrný moment stroje s drážkou č.2 je o 1,5 % a hodnota proudu o 7,8 % vyšší než u původní drážky. Pokud však porovnáme výsledky s optimalizovanou drážkou č.1, má tento tvar horší parametry, jelikož při stejné velikosti záběrného momentu je proud o 2,8 % (0,3 A) vyšší.

**Tabulka 20: Porovnání výsledků drážky č.2 - Záběrný moment**

		Původní	Drážka č.2		Původní
		FEM	FEM	RMxpřt	RMxpřt
$M_0$	[Nm]	1,30	1,32	1,42	1,41
$I_1$	[A]	10,3	11,1	11,2	11,1
$I_{hl}$	[A]	10,7	11,3	11,4	11,3
$I_{pom}$	[A]	1,28	1,25	1,25	1,24
$\cos(\varphi)$	[-]	0,925	0,944	0,964	0,966
$\Delta P$	[W]	2202	2412	2491	2466

I při jmenovitém chodu jsou výsledné parametry v porovnání s drážkou č.1 horší - účinnost je nižší o 0,1 %, účinník je nižší o 1 % a proud vyšší o 1,2 %. Má však o něco strmější momentovou charakteristiku v pracovní oblasti, jelikož došlo k malému nárůstu jmenovitých otáček. Jelikož však i s těmito hodnotami vykazuje výrazné zlepšení oproti parametrům původního stroje, byla by i tato drážka vhodná pro změnu materiálu klece z rezistivního materiálu AlSi12Mn na čistý hliník.

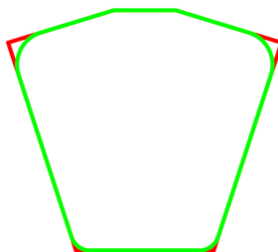
**Tabulka 21: Porovnání výsledků drážky č.2 - Jmenovitý chod**

		Původní	Drážka č.2		Původní
		FEM	FEM	RMxpřt	RMxpřt
$n_n$	[min <sup>-1</sup> ]	2621	2686	2670	2636
$\eta$	[%]	69,2	74,7	73,5	68,3
$\cos(\varphi)$	[-]	0,877	0,958	0,960	0,882
$I_1$	[A]	3,90	3,38	3,44	3,95
$I_{hl}$	[A]	3,80	2,94	2,90	3,79
$I_{pom}$	[A]	1,74	1,77	1,81	1,80
$\Delta P$	[W]	242	189	201	254

Po provedení simulací drážky se zaoblenými rohy byly výsledky porovnány s nezaoblenou drážkou a bylo zjištěno, že tato úprava nemá téměř žádný vliv na parametry stroje. Zmenšení plochy drážky o 2,3 % má za následek mírný nárůst odporu klece, avšak záběrný moment zůstal stejný. Rozdíl je v záběrném proudu, který poklesl o 0,1 A (přibližně 1 %) díky mírnému odsycení zubů rotoru v místech se zaoblením. Jelikož je drážka poměrně široká u vnějšího okraje rotoru, je sycení můstku dosti výrazné a proto i malá úprava geometrie v této oblasti má vliv na parametry stroje. Na druhou stranu sycení u dna drážky je menší a proto nebude mít zaoblení tak velký vliv.

Při jmenovitém chodu jsou opět rozdíly nepatrné. Otáčky klesly pouze o 3 min<sup>-1</sup>. Všechny ostatní parametry zůstaly stejné, což je dáno zaokrouhlováním hodnot. Pokud bychom porovnali například účinnost, zjistíme, že se zmenšila o

0,02 %. To je však zanedbatelný úbytek vzhledem k přesnostem simulačního programu.

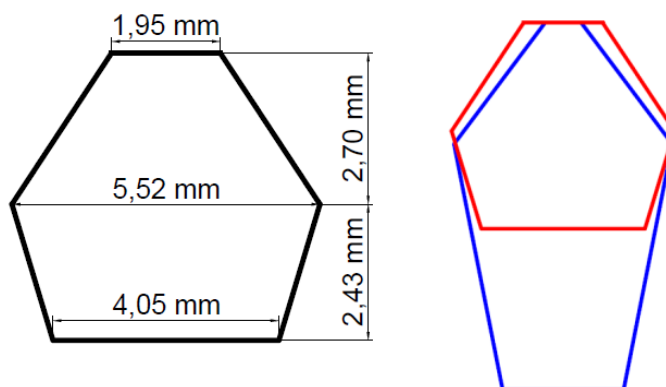


**Obrázek 53: Porovnání tvaru nezaoblené a zaoblené drážky č.2**

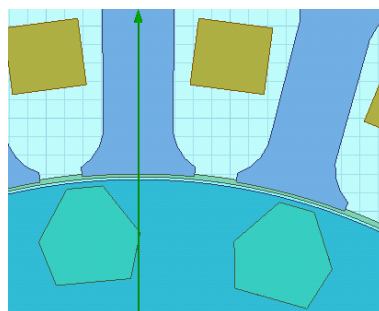
Všechny optimalizované drážky vykazují při jmenovitém chodu přibližně o 35 % menší zvlnění momentu než původní drážka. Jelikož se jedná o jednofázový stroj, není velikost výsledného vektoru toku konstantní po celou dobu otáčení, ale mění se v čase, což bude jedna z hlavních příčin pulzace momentu. Vlivem drážkování a při přesycení částí stroje se může tok uzavírat vzduchovou mezerou a vytvářet tak vyšší harmonické složky, které mají také velký vliv na pulzaci momentu. Dle frekvenčního rozboru průběhu indukce v mezeře mají vyšší harmonické složky větší hodnotu u stroje s původní drážkou než u optimalizovaných tvarů. Navíc jsou simulace prováděny pro přechodný stav s konstantním zatížením. To znamená, že dochází ke změně otáček v závislosti na průběhu momentu. U všech modelů byl zadán stejný moment setrvačnosti rotoru, avšak strmost momentové charakteristiky se u jednotlivých drážek liší, což by také mohlo ovlivnit zvlnění.

### 6.4.3 Optimalizovaná drážka č.3

Tato drážka je optimalizována na maximální účinnost stroje pro zjištění, jaké hodnoty lze dosáhnout. Optimalizace v RMxpertu nezahrnovala ve vyhodnocování velikost záběrného momentu, a proto je výsledná hodnota nižší než u původního stroje. Rozměry drážky lze vidět na obrázku níže. V porovnání s původní drážkou má podobnou geometrii, ale celková plocha se zmenšila na 62 %.



**Obrázek 54: Rozměry optimalizované drážky č.3 a porovnání s původní drážkou**



Obrázek 55: Detail optimalizované drážky č.3

Tabulka 22: Porovnání výsledků drážky č.3 - Záběrný moment

		Původní	Drážka č.3		Původní
		FEM	FEM	RMxpřt	RMxpřt
$M_0$	[Nm]	1,30	1,09	1,19	1,41
$I_1$	[A]	10,3	14,0	14,5	11,1
$I_{hl}$	[A]	10,7	14,4	14,8	11,3
$I_{pom}$	[A]	1,28	1,25	1,25	1,24
$\cos(\varphi)$	[-]	0,925	0,909	0,939	0,966
$\Delta P$	[W]	2202	2926	3133	2466

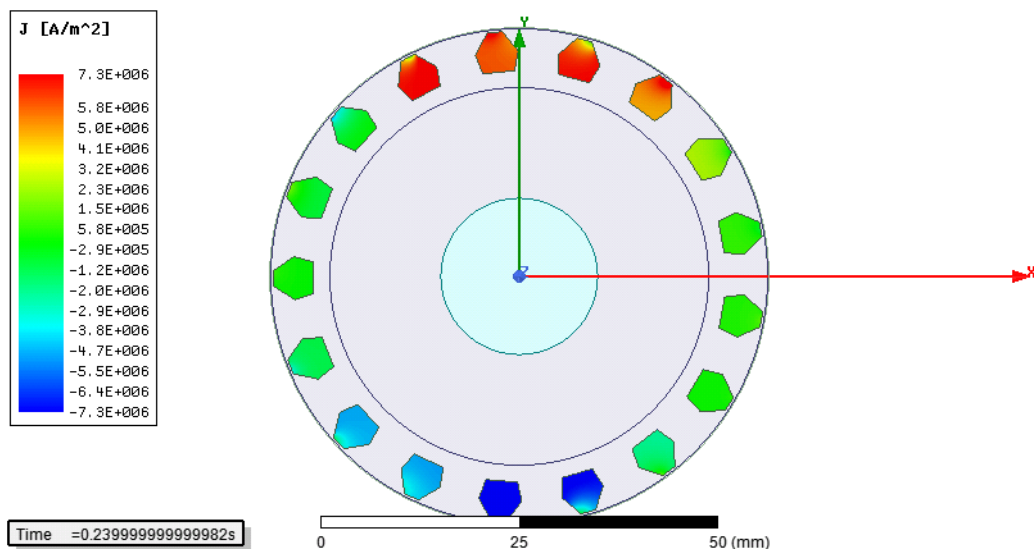
Při porovnání hodnot v záběrném stavu vidíme, že moment je nižší o 16 % a proud narostl o 36 %. Celkové ztráty jsou vyšší o 724 W vlivem snížení odporu klece, což má za následek zvýšení proudů nakrátko. Z toho je nárůst o 433 W způsoben Joulovými ztrátami ve vinutí.

Tabulka 23: Porovnání výsledků drážky č.3 - Jmenovitý chod

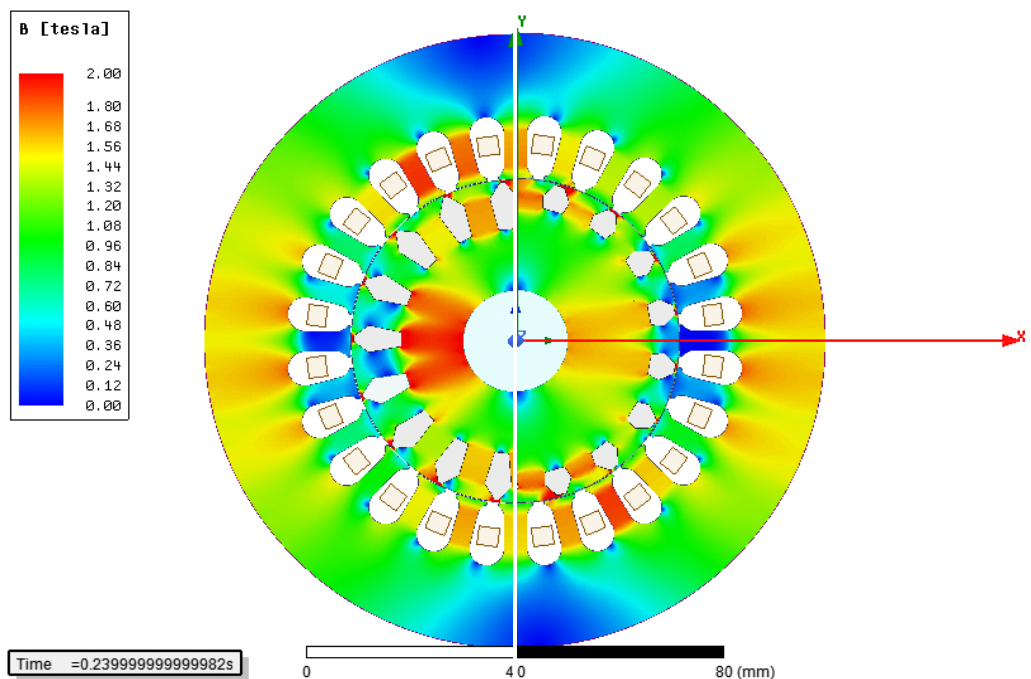
		Původní	Drážka č.3		Původní
		FEM	FEM	RMxpřt	RMxpřt
$n_n$	[min <sup>-1</sup> ]	2621	2789	2780	2636
$\eta$	[%]	69,2	77,8	76,0	68,3
$\cos(\varphi)$	[-]	0,877	0,940	0,945	0,882
$I_1$	[A]	3,90	3,44	3,52	3,95
$I_{hl}$	[A]	3,80	3,07	3,05	3,79
$I_{pom}$	[A]	1,74	1,76	1,80	1,80
$\Delta P$	[W]	242	165	184	254

Ve jmenovitém stavu naopak došlo k výraznému zlepšení parametrů, kdy otáčky narostly o 6,4 %, satorový proud klesl o 11,8 %, díky čemuž došlo k poklesu Joulových ztrát ve vinutí o 23,4 % (23 W). Došlo i k výraznému snížení Joulových ztrát o 25 % v kleci rotoru díky snížení odporu klece a vlivem poklesu skluzového kmitočtu. Účinník se zvýšil o 7 % a došlo k výraznému nárůstu účinnosti

– dle RMxprt o relativních 11,2 %, dle MKP o 12,4 %. Celkové ztráty v železe i jejich rozložení je opět podobné jako v předchozích případech. Největší část 46 % je generována ve jhu statoru a 25 % v zubech. Došlo k mírnému zvýšení první harmonické složky a snížení vyšších harmonických složek indukce v mezeře oproti původní drážce. Jho rotoru má nejvyšší, běžně se vyskytující hodnotu sycení rovnu 1,6 T, což je výrazné snížení oproti původní drážce (Obrázek 57). Ostatní části stroje zůstaly syceny přibližně stejně. Rozložení proudové hustoty je na Obrázek 56, kdy rozsah stupnice je navýšen v poměru plochy nové a původní drážky.



Obrázek 56: Rozložení proudové hustoty v tyčích motoru s optimalizovanou drážkou č.3



Obrázek 57: Rozložení indukce v motoru s původní drážkou (vlevo) a s optimalizovanou drážkou č.3 (vpravo)

## 6.5 Odhad výsledných parametrů motoru

Nyní může být proveden přibližný odhad parametrů stroje z výsledků simulací. Hodnoty získané z původního měření jsou vynásobeny poměrnou změnou veličiny dle MKP. Například pro drážku č.1 dostaneme předpokládané jmenovité otáčky:

$$n_n = 2633 \cdot \frac{(100 + 2,1)}{100} = 2688 \text{ min}^{-1} \quad (6.3)$$

**Tabulka 24: Odhad parametrů stroje s novým tvarem drážek**

			Měření	Drážka č.1		Drážka č.2		Drážka č.3	
Jmenovitý chod	$n_n$	[min <sup>-1</sup> ]	2633	2688	+2,1 %	2698	+2,5 %	2802	+6,4 %
	$\eta$	[%]	64,7	70,0	+8,1 %	69,9	+8,0 %	72,7	+12,4 %
	$I_1$	[A]	3,99	3,41	-14,5 %	3,46	-13,2 %	3,52	-11,8 %
Záběrný chod	$M_0$	[Nm]	1,23	1,25	+1,3 %	1,25	+1,5 %	1,03	-16,2 %
	$I_1$	[A]	10,03	10,43	+4,0 %	10,76	+7,3 %	13,56	+35,2 %

U drážky č.1 a č.2 došlo k malému nárůstu záběrného momentu a také záběrného proudu. Jelikož jsou drážky malé, došlo k odsycení rotoru a navýšení magnetizační indukčnosti, čímž klesl statorový proud přibližně o 0,5 A. Díky odsycení rotoru a poklesu Jouleových ztrát vzrostla účinnost přibližně o 5,3 %. U drážky č.3 se výsledky liší, jelikož nebyla optimalizována na dodržení stejného záběrného momentu 1,23 Nm, ale pouze na co nejvyšší účinnost, je její plocha přibližně dvojnásobná než u ostatních optimalizovaných drážek. Díky tomu došlo k poklesu odporu klece, záběrný moment se snížil o 0,2 Nm a záběrný proud narostl o 3,5 A. Na druhou stranu je účinnost při jmenovitém chodu vyšší o 8 % oproti původnímu stroji. Plocha drážky je menší oproti původní, ale větší než u ostatních optimalizovaných, díky čemuž nedošlo k tak výraznému odsycení rotoru. Statorový proud i přes to výrazně poklesl o 0,4 A, ale stále je o něco vyšší než u ostatních drážek. Momentová charakteristika je strmější v pracovní oblasti, došlo k nárůstu jmenovitých otáček a tím poklesl rotorový elektrický kmitočet. Díky velké vodivosti klece a menšímu skluzovému kmitočtu jsou tedy ztráty v rotoru výrazně menší.

Jelikož u všech optimalizovaných drážek došlo ke zvýšení účinnosti, může být odhad výsledných parametrů pesimistický, neboť byly všechny simulace prováděny pro konstantní teplotu stroje. Zvýšení účinnosti je však ekvivalent snížení celkových ztrát, což by mělo za následek ochlazení částí stroje a v případě vinutí a klece i snížení elektrického odporu. Jelikož je převážná část ztrát generována právě ve vodičích, mělo by snížení teploty nezanedbatelný vliv na výsledné parametry.

Na druhou stranu mohou být parametry i příliš optimistické, jelikož hodnota účinnku vypočtená z odhadovaných hodnot v Tabulka 24 vychází kolem 1. To je dáno velkým přesycováním stroje s původní drážkou v simulacích, díky čemuž protékal vinutím velký magnetizační proud. Při optimalizaci pak došlo ke zmenšení drážky, odsycení a snížení tohoto proudu. V reálné situaci však nebude odsycení tak výrazné, celkový proud bude o něco vyšší a účinnost stroje poklesne. Účinník by se měl tedy zlepšit oproti původnímu stroji, ale výslednou hodnotu nelze přesně odhadnout.

Mohou být také vypočítány předpokládané ztráty stroje s optimalizovanými drážkami. Celkové ztráty jsou získány z otáček a účinností dle Tabulka 24. Ztráty ve statorovém vinutí jsou vypočteny z naměřených odporů stroje a předpokládaných proudů hlavním a pomocným vinutím. Suma ztrát v železe, v rotoru, v kondenzátoru a dodatečných je poté vypočtena jako rozdíl celkových, mechanických a Joulových ve statoru.

**Tabulka 25: Předpokládané ztráty stroje s novým tvarem drážek**

		Měření	Drážka č.1	Drážka č.2	Drážka č.3
$\Delta P$	[W]	298	239	241	218
$\Delta P_{Cu}$	[W]	91,4	64,4	67,0	70,1
$\Delta P_{mech}$	[W]	15,9	16,2	16,3	16,9
$\Delta P_{Fe}$	[W]	191	158	158	131
$\Delta P_{Rot}$	[W]				
$\Delta P_{Cond}$	[W]				

V simulacích vycházely pro všechny typy drážek přibližně stejné ztráty v železe. Proud sekundárním vinutím byl také přibližně stejný, proto se i ztráty na připojeném kondenzátoru nebudou výrazně měnit. Lze tedy předpokládat, že snížení ztrát u optimalizovaných drážek je převážně ve statorovém vinutí, kleci rotoru a dodatečných. Ztráty v kleci mohou být odhadnuty pomocí zatěžovacího momentu a skluzové frekvence (viz. 3.4). Pro měřený stroj vyjdou 76 W, pro drážku č.1 a 2 přibližně 64 W a pro drážku č.3 41 W. Pokud tyto hodnoty odečteme od ztrát v předchozí tabulce, při předpokladu stejných ztrát na kondenzátoru u jednotlivých drážek, je hodnota ztrát v železe u původní drážky o 22 W vyšší než u optimalizovaných. To je pravděpodobně způsobeno vyšším sycením rotorového jha a také vlivem vyšších harmonických složek.

## 7 ZÁVĚR

Hlavním cílem této práce bylo provést optimalizaci tvaru rotorové drážky při změně materiálu klece z rezistivní slitiny AlSi12Mn na čistý hliník. Nejprve probíhaly simulace v prostředí analytického programu RMxpert. Následně byly výsledné tvary ověřeny pomocí metody konečných prvků v programu Ansys Maxwell. Hlavním kritériem optimalizace po změně materiálu bylo dodržení stejného záběrného momentu. Další úpravy tvaru pak měly směřovat k dosažení co nejvyšší účinnosti ve jmenovitém bodě (pro moment 1,982 Nm). Optimalizace byla prováděna pomocí genetického algoritmu napsaného v prostředí MATLAB a díky propojení těchto programů bylo možné měnit geometrii i vyhodnocovat výsledky dle potřeby.

V úvodních kapitolách byl čtenář seznámen s obecným principem činnosti a konstrukcí jednofázového asynchronního motoru. Poté následovalo měření parametrů motoru J22VV506 firmy ATAS elektromotory Náchod a.s. Nejprve byla změřena velikost záběrného momentu 1,19 Nm pro teplotu stroje rovné teplotě okolí. Při zatěžování momentem 1,982 Nm a po ustálení jeho teploty pak byla odečtena hodnota jmenovitých otáček 2633 min<sup>-1</sup>, účinnosti 64,7 %, proudů a napětí. Následovalo proměření momentové charakteristiky pomocí dynamometru pro zatížení do 2,5 Nm a poté i změření záběrného momentu 1,23 Nm při provozní teplotě stroje. Průběžně byly zaznamenávány i velikosti odporů hlavního a pomocného vinutí k určení oteplení vodičů.

Na základě dostupné výkresové dokumentace byl poté sestaven model v programu RMxpert, provedena simulace a výsledky srovnány s naměřenými hodnotami. Vlivem technologie výroby dochází ke zhoršení parametrů plechů a proto i v modelech byly uvažovány horší magnetizační i ztrátové křivky ve srovnání s katalogovými hodnotami. Teplota vinutí byla nastavena dle měření na hodnotu 82 °C a hodnota odporu klece rotoru zadána tak, aby simulovaná momentová křivka odpovídala naměřené v pracovní oblasti (Obrázek 19). Simulovaný záběrný moment pak vyšel o 14,6 % vyšší než jeho naměřená hodnota. Je možné, že při měření měl kondenzátor jinou kapacitu než 16 µF - dle tolerance udávané výrobcem až o 5 %. Celkové ztráty byly při měření 298 W, v simulaci jen 254 W, což je pravděpodobně způsobeno nepřesným výpočtem analytických vzorců nebo dodatečnými ztrátami vlivem vyšších harmonických, se kterými program nepočítá. Dle rozboru ztrát jsou u měřeného stroje oproti simulacím pravděpodobně vyšší ztráty v železe.

Z porovnání parametrů stroje při změně velikosti rotorové drážky a kruhů nakrátko bylo zjištěno, že změnou materiálu klece a úpravou tvaru rotorové drážky lze dosáhnout původní hodnoty záběrného momentu a navýšit účinnost ve



jmenovitém bodě. Po upravení modelu tak, aby umožňoval rozsáhlé změny rotorové drážky, byl proveden nespočet optimalizací, nejprve pro obecnou drážku, u které byla dodržována přibližně stejná plocha. Z výsledků však vyplynulo, že pro stejnou plochu nelze dosáhnout původního záběrného momentu z důvodu snížení odporu klece změnou materiálu. Jelikož se jedná o malý stroj, má skinefekt nepatrný vliv na rozložení proudové hustoty a proto nejsou vhodné hluboké tvary drážek nebo dvojité klece. Vlivem vysokého sycení rotorového jha (až 2 T) jsou naopak vhodné malé drážky umístěné blízko povrchu rotoru. Proto byl následně tvar drážky co nejvíce zjednodušen a z výsledků optimalizace vybrány dvě drážky, u kterých stroj dosahuje požadovaného záběrného momentu a zároveň vysoké účinnosti. Třetí vybraná drážka je optimalizována na nejvyšší možnou jmenovitou účinnost bez ohledu na záběrný moment.

Drážka č.1 má přibližně 3x menší plochu než původní drážka. Díky tomu je celkový odpor klece přibližně stejný a záběrný moment o 1,5 % vyšší dle MKP. Záběrný proud vzrostl téměř o 5 % a došlo ke zvýšení účinníku o 0,016. Při jmenovitém chodu došlo k nárůstu otáček o 2 %. Díky menším rozměrům drážky výrazně pokleslo sycení jha rotoru z 2 T na 1,5 T, vzrostla magnetizační indukčnost, došlo ke snížení proudu a tím i Jouleových ztrát ve vinutí o 29 W. Celkové ztráty jsou nižší o 55 W a účinnost vzrostla o 5,6 %. Nejvíce ztrát v železe je generováno ve statorovém jhu (48 %). Další ztráty jsou pak v zubech a na povrchu rotoru (29 %) a zubech statoru (21 %). Byla také provedena simulace kulaté drážky stejného průřezu pro zjištění vlivu tvaru na parametry stroje. Při jmenovitém chodu byly výsledky totožné, v záběrném stavu však došlo k malému navýšení záběrného momentu o 2 % a snížení záběrného proudu o 1 %. Zaoblení hran drážky tedy nemá výrazný vliv na chod stroje. To je však dáno malými rozměry drážky a malým sycením v jejím okolí. Pokud by byl rotor výrazně přesycen, měla by i malá úprava tvaru velký vliv na provozní parametry.

Drážka č.2 má opět plochu rovnu 30 % původní hodnoty. Ve srovnání s první drážkou jsou však její parametry horší, jelikož při stejném záběrném momentu je proud o 2,8 % (0,3 A) vyšší. I při jmenovitém chodu vykazuje nižší účinnost o 0,1 %, účinník o 1 % a vyšší proud o 1,2 %. To je pravděpodobně způsobeno přesycováním můstku a zvýšením magnetizačního proudu, jelikož má tato drážka větší objem klece u vzduchové mezery než drážka č.1. Byl také zjišťován vliv zaoblení rohů drážky a po nasimulování vyplynulo, že tato úprava nemá téměř žádný vliv na parametry. Tento tvar tedy také vykazuje zlepšení jmenovitých parametrů oproti původnímu stroji a je vhodný jako náhrada stávající drážky.

Drážka č.3 je optimalizována na maximální účinnost bez ohledu na dodržení záběrného momentu. Její průřez je roven 62 % původní plochy a tvarem připomíná

původní drážku se zmenšenou hloubkou. Záběrný moment je nižší než požadovaná hodnota o 16 % (0,21 Nm) a záběrný proud narostl o 36 % (3,7 A). Ve jmenovitém chodu však došlo k výraznému zlepšení parametrů. Otáčky narostly o 6,4 %, poklesl skluzový kmitočet, a jelikož má klec vyšší vodivost než u ostatních drážek, výrazně se snížily její Joulovy ztráty. Sycení rotorového jha kleslo z 2 T na 1,6 T, díky tomu došlo ke snížení statorového proudu o 11,8 % (0,46 A) a Joulových ztrát ve vinutí o 23 W. Účinnost je dle MKP vyšší o 8,6 %.

V kapitole 6.5 jsou pak vypočítány přibližné parametry (Tabulka 24) a ztráty (Tabulka 25) reálného motoru s optimalizovanými drážkami. Je však nutno říci, že v simulacích byla uvažována konstantní teplota stroje. Jelikož všechny optimalizované drážky vykazují zvýšení účinnosti (nižší ztráty), dojde tím ke snížení oteplení. Největší část ztrát je generována ve vodičích a nižší oteplení má za následek vyšší vodivost. V případě vinutí bude na odporu nižší napěťový úbytek a vzroste sycení. U klece dojde snížením odporu k poklesu záběrného momentu a ve jmenovitém bodě pak ke zvýšení otáček stroje, jelikož bude momentová charakteristika strmější. Odsycení stroje a následné zlepšení parametrů však nemusí být tak výrazné jako v simulacích, jelikož u referenční simulace pro původní drážku byla hodnota účinníku jen 0,877 oproti naměřené 0,92. To znamená, že magnetizační proud je ve skutečnosti nižší než simulovaný a zmenšením drážky nemusí dojít k tak výraznému snížení.

Na závěr lze tedy říct, že optimalizace drážek je jedna z možností pro dosažení vyšší účinnosti stroje a případnou změnu i jeho dalších parametrů. Jelikož jsou drážky většinou vystřihovány, neměla by představovat změna jejich tvaru výrazný ekonomický problém díky pravidelné výměně prostřihovačů.

# LITERATURA

- [1] BOLDEA, I. a S. A. NASAR. The induction machine handbook. Boca Raton: CRC Press, 2002. ISBN 0849300045
- [2] BRÁZDA, Ing. M. a Ing. R. STAŇA. *Výpočet asynchronního motoru*. Brno, 1973.
- [3] MACH, Martin. *Analýza ztrát asynchronních motorů malého výkonu* [online]. Brno, 2015 [cit. 2017-12-17]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=111124](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=111124). Dizertační. Vysoké Učení Technické.
- [4] MUCZKA, Vojtěch. *Rozbor elektromechanických parametrů historického asynchronního stroje a jejich srovnání se strojem moderním* [online]. Brno, 2015 [cit. 2017-12-17]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=104090](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=104090). Bakalářská. Vysoké Učení Technické.
- [5] *Cogent M700-50A* [online]. [cit. 2017-12-27]. Dostupné z: <https://cogent-power.com/cms-data/downloads/m700-50a.pdf>
- [6] ŠIŠÁK, David. *Optimalizace tvaru drážek asynchronního motoru* [online]. Brno, 2017 [cit. 2017-12-17]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=147085](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=147085). Diplomová. Vysoké Učení Technické.
- [7] HAUPT, Randy L. a Sue Ellen HAUPT. *Practical Genetic Algorithms*. 2. vydání. Hoboken, New Jersey.: John Wiley & Sons, 1998. ISBN 0-471-45565-2.
- [8] TVRDÍK, Josef. *Stochastické algoritmy pro globální optimalizaci* [online]. Ostrava, 2010 [cit. 2017-12-02]. Dostupné z: <https://publi.cz/download/publication/37?pc=1>. Studijní materiály pro distanční kurz. Ostravská univerzita.
- [9] YU, Xinjie. a Mitsuo GEN. *Introduction to evolutionary algorithms*. New York: Springer, c2010. Decision engineering. ISBN 978-1-84996-128-8.
- [10] ONDRŮŠEK, Čestmír. *Elektrické stroje: Asynchronní stroje*. Brno. Skripta. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [11] [online]. [cit. 2017-11-26]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/788>
- [12] VRÁNA, CSC., doc. Ing. Václav. *Asynchronní stroje* [online]. 2005 [cit. 2017-11-30]. Dostupné z: [http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/hgf/elektrotechnika/sylab\\_asynchronni\\_stroje\\_bc.pdf](http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/hgf/elektrotechnika/sylab_asynchronni_stroje_bc.pdf)
- [13] SILVA, Claudia A., Alvaro B. DIETRICH, Renato LOPES a Renato CARLSON. *Rotor Cage of Single-Phase Induction Motors - Process Analysis* [online]. Brazil, 2009 [cit. 2017-12-03]. Dostupné z:

- <http://ieeexplore.ieee.org/document/5075396/>. Elektronický článek. Federal University of Santa Catarina.
- [14] MARTINEK, Radek. *Elektromotory malého výkonu* [online]. Brno, 2017 [cit. 2017-12-17]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=147477](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=147477). Diplomová. Vysoké Učení Technické.
  - [15] BOURCHAS, Konstantinos. *Manufacturing Effects on Iron Losses in Electrical Machines* [online]. Stockholm, Sweden, 2015 [cit. 2017-12-14]. Dostupné z: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:847378/FULLTEXT01.pdf>. Master Thesis. School of Electrical Engineering.
  - [16] ANSYS Maxwell 2D: user's guide - Maxwell 2D [online]. Canonsburg, PA, 2011 [cit. 2017-12-14]. Dostupné z: [http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/CompleteMaxwell2D\\_V14.pdf](http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/CompleteMaxwell2D_V14.pdf)
  - [17] Výkresová dokumentace motoru J22VV499 firmy ATAS Náchod a.s.
  - [18] VOŘÍŠEK, Tomáš, Petr CHMEL, Michal STAŠA a Bohuslav MÁLEK. Přehled implementace směrnice o ekodesignu a požadavků na energetickou efektivnost vybraných skupin výrobků. *Informační portál Ministerstva průmyslu a obchodu* [online]. Praha, 2011 [cit. 2017-12-17]. Dostupné z: <http://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/prehled-implementace-smernice-o-ekodesignu-a-pozadavku-na-en.pdf>
  - [19] ZELINKA, Ivan. *Evoluční výpočetní techniky: principy a aplikace*. Praha: BEN - Technická literatura, 2009. ISBN 978-80-7300-218-3.
  - [20] VOLNÁ, Eva. *Evoluční algoritmy a neuronové sítě*. Ostrava, 2012. Výukový materiál. Ostravská univerzita.
  - [21] KRÖMER, Pavel. *Optimalizace pomocí mravenčích kolonií* [online]. Ostrava, 2012 [cit. 2017-12-17]. Dostupné z: <https://homel.vsb.cz/~kro080/mravenci.pdf>. VŠB Technická univerzita.
  - [22] KVASNIČKA, Vladimír, Jiří POSPÍCHAL a Peter TIŇO. *Evolučné algoritmy*. Bratislava, 2000. Kniha. Slovenská Technická Univerzita.
  - [23] NAKATA, T., M. NAKANO a K. KAWAHARA. Effects of Stress Due to Cutting on Magnetic Characteristics of Silicon Steel. *IEEE Translation Journal on Magnetics in Japan* [online]. 1992, 453-457 [cit. 2017-12-20]. ISSN 0882-4959. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4565422/>
  - [24] WILLIAMSON, Stephen a Catherine I. MCCLAY. Optimization of the geometry of closed rotor slots for cage induction motors. *IEEE Transactions on Industry Applications* [online]. 1996, (32), 560-568 [cit. 2017-12-27]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/502167/>
  - [25] AKHTAR, Junaid, R. K. BEHERA a S. K. PARIDA. Optimized rotor slot shape for squirrel cage induction motor in electric propulsion application. *2014 IEEE 6th India International Conference on Power Electronics* [online]. 2014, 1-5 [cit. 2017-12-27]. ISSN 2160-3170. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7115846/>

- [26] Matlab. *MathWorks* [online]. [cit. 2017-12-27]. Dostupné z: [https://uk.mathworks.com/help/matlab/learn\\_matlab/product-description.html](https://uk.mathworks.com/help/matlab/learn_matlab/product-description.html)
- [27] *Advanced Techniques For Greater Accuracy, Capacity and Speed Using Maxwell v11* [online]. [cit. 2017-12-27]. Dostupné z: <http://www.figes.com.tr/ansoft/teknik-kaynak/Maxwel/sunumlar/Advanced-Techniques-For-Greater-Accuracy-Capacity-and-Speed-Using-Maxwell.pdf>
- [28] *ELUC* [online]. [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/423>
- [29] Teplotní závislost odporu kovových vodičů. *ELEKTRO* [online]. 2008, 1/2008, 22-23 [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/36489.pdf>
- [30] *ELUC* [online]. [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/421>

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

$N$	$[-]$	Počet závitů cívky
$\Phi_{s,max}$	$[Wb]$	Maximální hodnota magnetického toku
$\Psi_{max}$	$[Wb]$	Maximální hodnota spřaženého magnetického toku
$L$	$[H]$	Indukčnost
$I_{max}$	$[A]$	Maximální proud cívkou
$U_{rot}$	$[V]$	Napětí v kleci rotoru
$f_{rot,el}$	$[Hz]$	Rotorová elektrická frekvence
$M$	$[Nm]$	Moment
$B_{s,max}$	$[T]$	Maximální hodnota sycení
$R_{rot}$	$[\Omega]$	Elektrický odpor klece rotoru
$I_{rot}$	$[A]$	Proud rotorovou klecí
$L_{\sigma}$	$[H]$	Rozptylová indukčnost
$F(t)$	$[A]$	Prostorový vektor magnetomotorického napětí (MMF)
$F_{1m}$	$[A]$	Velikost první harmonické složky MMF hlavního vinutí
$F_{1a}$	$[A]$	Velikost první harmonické složky MMF pomocného vinutí
$\omega_{1t}$	$[rad.s^{-1}]$	Kmitočet MMF
$\gamma_i$	$[^{\circ}]$	Fázový posun mezi hlavním a pomocným tokem
$F_{ampl}(t)$	$[A]$	Amplituda magnetomotorického napětí
$\alpha$	$[m]$	Hloubka vniku vlivem skinefektu
$\omega$	$[rad.s^{-1}]$	Kmitočet elektrického pole
$\mu$	$[H.m^{-1}]$	Magnetická permeabilita
$\gamma$	$[\Omega^{-1}.m^{-1}]$	Měrná elektrická vodivost
$\xi$	$[-]$	Poměrná výška vlivu skinefektu
$\varphi(\xi)$	$[-]$	Činitel zvýšení odporu vlivem skinefektu
$k_r$	$[-]$	Činitel zvýšení odporu vlivem skinefektu
$b_{v1}, b_{v2}$	$[m]$	Šířky tyče v kleci
$h_{v0}$	$[m]$	Výška vodiče v kleci
$Q$	$[-]$	Hodnota charakterizující typ vinutí
$m$	$[-]$	Počet vodičů v drážce
$\lambda$	$[-]$	Činitel poměru délky čel a celkové délky vodiče
$P_1$	$[W]$	Příkon motoru
$U_1$	$[V]$	Napájecí napětí
$I_1$	$[A]$	Napájecí proud
$\varphi$	$[^{\circ}]$	Fázový posun mezi napětím a proudem

$P_2$	[W]	Výkon stroje
$\omega_{\text{mech}}$	[rad.s <sup>-1</sup> ]	Mechanická úhlová rychlost
$\Delta P_{j1}$	[W]	Jouleovy ztráty ve vinutí statoru
$\Delta P_{\text{Fe}}$	[W]	Ztráty v železe
$\Delta P_{j2}$	[W]	Jouleovy ztráty v kleci
$\Delta P_{\text{mech}}$	[W]	Mechanické ztráty
$\Delta P_d$	[W]	Dodatečné ztráty
$R_{hl}$	[Ω]	Odpor hlavního statorového vinutí
$R_{\text{pom}}$	[Ω]	Odpor pomocného statorového vinutí
$I_{hl}$	[A]	Proud hlavním vinutím statoru
$I_{\text{pom}}$	[A]	Proud pomocným vinutím statoru
$\omega_{\text{rot,el}}$	[rad.s <sup>-1</sup> ]	Rotorový elektrický kmitočet
$p$	[-]	Počet pólů stroje
$\Delta P_h$	[W]	Hysterezní ztráty v železe
$\Delta P_v$	[W]	Vířivé ztráty v železe
$W$	[J]	Energie potřebná k proběhnutí jedné periody střídavého magnetování
$f$	[Hz]	Frekvence napájecího napětí
$U_{\text{ef}}$	[V]	Efektivní hodnota napětí
$R_{\text{ekv}}$	[Ω]	Ekvivalentní odpor představující ztráty vířivými proudy
$U_{1,a}$	[V]	Amplituda napájecího napětí
$K_h$	[-]	Činitel charakterizující hysterezní ztráty
$K_v$	[-]	Činitel charakterizující vířivé ztráty
$K_d$	[-]	Činitel charakterizující dodatečné ztráty
$\Delta p_h$	[W.kg <sup>-1</sup> ]	Měrné ztráty hysterezní
$\Delta p_v$	[W.kg <sup>-1</sup> ]	Měrné ztráty vířivé
$\Delta p_d$	[W.kg <sup>-1</sup> ]	Měrné ztráty dodatečné
$\alpha$	[-]	Koeficient charakterizující druh materiálu
$N_{\text{keep}}$	[-]	Počet přeživších členů populace v další generaci
$P_n$	[-]	Pravděpodobnost výběru jedince
$P_i$	[-]	Kumulativní pravděpodobnost výběru jedince
$n_{\text{člen}}$	[-]	Pořadí člena populace
$C_n, C_m$	[-]	Cost n-tého, m-tého člena populace
$x_{\text{nové}}$	[-]	Nová hodnota chromozomu
$\beta$	[-]	Náhodné číslo z intervalu 0-1
$x_{n,M}$	[-]	Hodnota chromozomu matky v místě n

$x_{n,O}$	[-]	Hodnota chromozomu otce v místě n
C	[F]	Kapacita kondenzátoru
$\varphi_{pom}$	[°]	Fázový posun mezi proudem $I_1$ a proudem $I_{pom}$
$\varphi_{hl}$	[°]	Fázový posun mezi proudem $I_1$ a proudem $I_{hl}$
$\Delta\vartheta_{hl}$	[K]	Oteplení hlavního vinutí vůči teplotě 20°C
$\Delta\vartheta_{pom}$	[K]	Oteplení pomocného vinutí vůči teplotě 20°C
n	[min <sup>-1</sup> ]	Mechanické otáčky stroje
$\Delta\vartheta_{klec}$	[K]	Oteplení klece vůči teplotě 20°C
$\rho_{\Delta\vartheta}$	[μΩ.m]	Rezistivita materiálu klece při daném oteplení
$\rho_{20}$	[μΩ.m]	Rezistivita materiálu klece při teplotě 20°C
$\alpha_{Al}$	[K <sup>-1</sup> ]	Teplotní součinitel elektrického odporu pro hliník
$\Delta P_{cond}$	[W]	Jouleovy ztráty na kondenzátoru
$b_{s1}$	[m]	Šířka střední části drážky
$h_{s2}$	[m]	Hloubka spodní části drážky
$\eta$	[%]	Účinnost
$M_0$	[Nm]	Záběrný moment
$n_n$	[min <sup>-1</sup> ]	Jmenovité otáčky
$R_{vodič}$	[Ω]	Odpor vodiče
$\rho, \rho_1, \rho_2$	[Ω <sup>-1</sup> .m <sup>-1</sup> ]	Měrné elektrické vodivosti
l	[m]	Délka vodiče
S, S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub>	[m <sup>2</sup> ]	Průřez vodiče
$\Delta P$	[W]	Celkové ztráty